



ANA ISABEL

HEITOR PEREIRA

**Impacto do fogo no carbono orgânico em solos do Centro de
Portugal**



**ANA ISABEL
HEITOR PEREIRA**

**Impacto do fogo no carbono orgânico em solos do Centro
de Portugal**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica de Maria Eufémia Teijeiro, Investigadora do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) e, coorientação científica de Doutor Valdemar Esteves, Professor do Departamento de Química da Universidade de Aveiro.

Tese desenvolvida no âmbito do projeto
FIRECNUTS
(PTDC/AGRCFL/104559/2008), com
apoio financeiro da FCT/MCTES através
de fundos nacionais (PIDDAC) e com
cofinanciamento pelo Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional (FEDER)
através do COMPETE – Programa
Operacional Fatores de
Competitividade (POFC).

O júri

Presidente

Prof. Doutora Maria Isabel da Silva Nunes

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro

Vogal - Arguente

Prof. Doutor António José Dinis Ferreira

Prof. Adjunto do Departamento de Ambiente da Escola Superior Agrária de
Coimbra - Instituto Politécnico de Coimbra

Vogal - Orientador

Doutora Maria Eufémia Varela Teijeiro

Investigadora de Pós-Doutoramento do Centro de Estudos do Ambiente e
do Mar (CESAM) do Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro

Agradecimentos

À Doutora Maria Eufémia Teijeiro o meu profundo agradecimento por toda a orientação, paciência, motivação e total disponibilidade que sempre demonstrou.

Ao professor Valdemar Esteves pela aceitação, disponibilidade e ajuda, assim como a todos os companheiros de laboratório.

A toda a equipa do projeto FireCNuts e outros, que tão bem me receberam, especialmente a todos os que me acompanharam em saídas de campo. Agradeço também ao Doutor Jan Jacob Keizer pela motivação ao longo do trabalho.

Ao corpo docente do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro que contribuiu de forma essencial para a minha formação.

A todos os colegas e amigos que ao longo destes anos me acompanharam e apoiaram, que estiveram e estão sempre presentes, em especial à Catarina, Daniela, Isabel e Rosinha.

E por fim um especial agradecimento aos meus pais e à minha família pelo apoio incondicional durante estes anos. Já não era sem tempo!

Palavras-chave

Incêndios florestais, *stock* de carbono (ou reserva de carbono), carbono orgânico, solo.

Resumo

O solo é considerado o maior reservatório de carbono global e um importante sumidouro de CO₂ atmosférico. Na maior parte dos solos, a maioria do carbono é tida como carbono orgânico. Os incêndios florestais são um fenómeno frequente nos ecossistemas mediterrânicos, em especial em Portugal. Nas últimas décadas verificou-se um aumento do número de incêndios e os cenários de alterações climáticas sugerem que os regimes de incêndios se poderão intensificar no futuro. Os fogos florestais têm associados vários impactos ambientais, pelos seus efeitos sobre as características físicas e químicas do solo, entre outros. Estes efeitos variam consoante a temperatura que o fogo atinge, alterando as propriedades do solo no espaço e no tempo após o fogo. É comum o interesse no estudo do carbono orgânico do solo devido à sua importância nas principais funções do solo e por ser um indicador universal da qualidade deste. Neste trabalho foi estudado o conteúdo de carbono orgânico no solo numa área no concelho de Sever do Vouga, na região centro norte de Portugal, que ardeu durante o verão de 2010. Pretende-se avaliar o *stock* de carbono após o incêndio, estudar padrões temporais e espaciais, avaliar o impacto do fogo em encostas com diferente geologia e cobertura vegetal e inferir sobre a variabilidade espacial numa encosta. Para tal, foram seleccionadas 5 encostas dentro da área ardida, com duas espécies florestais, eucalipto e pinheiro bravo, e dois tipos de geologia, granito e xisto. Para referência foi igualmente estudada uma encosta não queimada próxima da área de estudo, plantada com eucalipto sobre rocha-mãe de xisto. Foram recolhidas e analisadas amostras de cinza e manta morta e amostras de solo a duas profundidades, de 0 a 2 cm e de 2 a 5 cm, referentes aos primeiros dois anos após o incêndio, num total de 296 amostras. Na determinação do carbono orgânico total foi utilizado um Analisador TOC-V CPH equipado com um amostrador de sólidos SSM-5000A devidamente calibrado. A concentração de carbono é ligeiramente superior em solos sob rocha-mãe xisto do que em solos de granito, e também ligeiramente superior, em eucaliptais do que em pinhais. Após o incêndio existe um aumento de carbono orgânico no solo, que sugere a incorporação de biomassa florestal queimada no solo. A variabilidade espacial entre pontos numa mesma encosta mostra que cada transecto representa a heterogeneidade da encosta.

Keywords

Forest wildfires, carbon stock (alternatively 'carbon storage' or 'carbon pool'), organic carbon, soil.

Abstract

Soil is considered the largest carbon reservoir and an important global sink for atmospheric CO₂. In most soils, most of the carbon is taken as organic carbon. Forest fires are a frequent occurrence in Mediterranean ecosystems, especially in Portugal. In recent decades there has been an increase in the number of fires and climate change scenarios suggest that the fire regimes are likely to increase in the future. Forest fires are associated with various environmental impacts through its effects on the physical and chemical characteristics of the soil, among others. These effects vary depending on the temperature the fire reaches, changing soil properties in space and time after it. Its common interest in the study of soil organic carbon is due to the importance in major soil functions and for being a universal indicator of soil quality. In this paper, the content of soil organic carbon was studied, in an area in the municipality of Sever do Vouga, in the central north of Portugal, which burned during the summer of 2010. The aim of this study is to assess the after fire carbon stock, studying temporal and spatial patterns, assess the impact of fire on slopes with different geology and vegetation cover and infer upon the spatial variability on a slope. Five slopes within the burned area were selected, with two forest species, eucalyptus and pine, and two types of geology, granite and schist. For reference a slope unburned near the study area was also selected, with eucalyptus planted on schist bedrock. Samples of ash and litter, and soil samples at two depths from 0 to 2 cm and 2 to 5 cm, were collected and analysed, referring to the first two years following the fire, for a total of 296 samples. To determine the total organic carbon content the analyser used was TOC-V CPH equipped with a solid sampler SSM-5000A. The carbon concentration is slightly higher in soils under bedrock shale than in granite soils, and also slightly higher in eucalyptus than in pine forests. After the fire there is an increase of soil organic carbon, which suggests the incorporation of burned forest biomass in the soil. The spatial variability between points in the same slope shows that each transept represents the heterogeneity of the slope.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABELAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	iv
1. Capítulo – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. A problemática dos incêndios em Portugal.....	2
1.2.1. Incêndios florestais	2
1.2.2. Floresta portuguesa	5
1.3. Impacto dos incêndios florestais	5
1.4. A movimentação de carbono no solo.....	7
1.4.1. O ciclo de carbono	7
1.4.2. O carbono no solo.....	10
1.5. Objetivos e estrutura da tese	13
2. Capítulo – IMPACTO DO FOGO NO CARBONO ORGÂNICO EM SOLOS DO CENTRO DE PORTUGAL.....	15
Resumo	15
2.1. Introdução	16
2.2. Materiais e métodos	17
2.2.1. Área de Estudo.....	17
2.2.2. Desenho experimental.....	18
2.2.3. Recolha de amostras de solo	20
2.2.4. Análise laboratorial	21
2.3. Resultados e discussão.....	25

2.3.1.	<i>Stock</i> de carbono orgânico no solo	25
2.3.2.	Variação temporal da concentração de carbono no solo	27
2.3.3.	Variação temporal da concentração de COS em função da geologia	29
2.3.4.	Variação temporal da concentração de COS em função do coberto vegetal	31
2.3.5.	Efeito do fogo na variação temporal da concentração de COS	32
2.3.6.	Variação espacial da concentração de COS	33
2.4.	Conclusões	35
3.	Capítulo – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
I.	Anexo	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - Classificação de incêndios: a) Incêndio subterrâneo b) Incêndio superficial c) Incêndio de copa (Castro et al., 2003).....	3
Figura 1-2 - Número de ocorrências e área ardida no período de 1980-2012 (ICNF, 2013).....	4
Figura 1-3 - a) Stock (Pg C) e fluxos (Pg C por ano) do ciclo global de carbono b) Stock (Mg C.ha-1) e fluxos (Mg C.ha-1 por ano) de carbono expressos como média por ha de área continental (Janzen, 2004).....	8
Figura 1-4 - Principais processos que influenciam o conteúdo em carbono no solo (Machado, 2005).....	10
Figura 1-5 - Exemplo da distribuição de horizontes no solo (USDA, 2013).....	11
Figura 2-1 - Localização da área de estudo e diferentes encostas.	17
Figura 2-2 - a) Desenho experimental. b) Exemplo da amostragem de solo.	20
Figura 2-3 - a) TOC-V CPH de combustão húmida. b) SSM-5000A de combustão seca.	22
Figura 2-4 - Curvas típicas da análise de CT: a) amostra de solo b) amostra de glucose.	22
Figura 2-5 - Reta de calibração para a análise CO.	23
Figura 2-6 - Reta de calibração para a análise CI.	24
Figura 2-7 - <i>Stock</i> de carbono orgânico no solo nas diferentes encostas.	26
Figura 2-8 - Variação temporal da concentração de COS [%] nas encostas queimadas.	28
Figura 2-9 – Variação temporal da concentração de COS [%] na encosta não queimada.	29
Figura 2-10 - Variação temporal do COS em encostas com diferente geologia.	30
Figura 2-11 - Variação temporal do COS em função do coberto vegetal.....	31
Figura 2-12 - Efeito do fogo na variação temporal de COS.	32
Figura 2-13 - Variabilidade espacial da concentração de COS, profundidade 0-2 cm.	34
Figura 2-14 - Variabilidade espacial da concentração de COS, profundidade 2-5 cm.	34

Figura I-1 - Diagrama de funcionamento da unidade TOC-V + SSM-5000A	45
---	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-1 - Efeitos dos incêndios na MO do solo.	6
Tabela 2-1 - Características gerais das encostas estudadas.	19
Tabela 2-2 - Calendário de recolha de amostras de solo após o incêndio.	21
Tabela 2-3 - LD e LQ por reta de calibração.	24
Tabela 2-4 - Concentração de COS em todas as encostas, em %.	25
Tabela 2-5 – Stock de carbono orgânico em todas as encostas, em kg.m ⁻²	26

LISTA DE ABREVIATURAS

C	Carbono
COS	Carbono orgânico no solo
MOS	Matéria orgânica no solo
COT	Carbono orgânico total
CT	Carbono total
CI	Carbono inorgânico

1. Capítulo – INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O fogo é um processo que pode ocorrer naturalmente e um dos fatores mais importantes na dinâmica de muitos ecossistemas terrestres. A região mediterrânea é recorrentemente afetada pelo fogo, pelo que este moldou os seus ecossistemas, alterando as suas características e a sua distribuição.

Portugal em especial é propício à ocorrência de incêndios florestais, devido ao clima e à plantação extensa de espécies altamente inflamáveis (Catry, 2007). Nas últimas décadas verificou-se um aumento do número de incêndios e os cenários de alterações climáticas sugerem que os regimes de incêndios se poderão intensificar no futuro (Carvalho *et al.*, 2010).

Os principais impactos dos incêndios são a perda de área florestal que afeta os ciclos biogeoquímicos e os ecossistemas naturais, levando à perda de biodiversidade, para além do impacto na economia, ao porem em risco edifícios e populações, levando ao aumento do orçamento canalizado para a gestão de florestas e práticas de combate ao fogo.

Nos últimos anos este tema tem atraído muita atenção, devido não só ao aumento do número de incêndios, mas também ao crescente debate do tema das alterações climáticas, em especial do ciclo do carbono. Na realidade, é reconhecido o potencial do solo como sumidouro de carbono, para combater a tendência do aumento da concentração de CO₂ atmosférico (Lal *et al.*, 1998 e Lal, 2004).

As propriedades do solo podem ser substancialmente alteradas no espaço e no tempo após o fogo (Certini, 2005). Estas modificações vão depender do tipo de solo afetado e da severidade do incêndio. Os solos que sofreram ação do fogo são mais suscetíveis a degradação, em especial através de processos de erosão, também em consequência do desaparecimento do coberto vegetal. Um indicador universal da qualidade dos solos é o conteúdo em carbono orgânico no solo (Stolbovoy *et al.*, 2007).

Enquanto a erosão do solo em áreas recentemente ardidas tem vindo a ser bastante estudada, as perdas associadas de carbono ainda são pouco conhecidas. O mesmo acontece em relação ao *stock* de carbono em solos florestais recentemente ardidos, que são fundamentais como referência para avaliar a relevância destas perdas.

Esta dissertação, cuja recolha e análise de dados foi desenvolvida no âmbito do projeto FIRECNUTS (Efeitos de fogos florestais na quantidade e dinâmica de carbono e nutrientes no solo e na sua exportação por escorrência superficial) PTDC/AGR-CFL/104559/2008, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal, centrou-se no estudo dos efeitos de incêndios florestais no conteúdo de carbono orgânico do solo, numa área ardida no centro norte de Portugal, durante o período de dois anos após o incêndio ocorrido a 26 de julho de 2010.

1.2.A problemática dos incêndios em Portugal

1.2.1. Incêndios florestais

Os diferentes tipos de incêndios florestais e os impactos no ecossistema dependem de vários fatores, como o clima, condições meteorológicas e estado do próprio ecossistema, em especial da vegetação.

A ignição de um fogo depende da existência de um volume de combustíveis finos com continuidade espacial e grau de secura adequados a uma combustão sustentável. O volume de combustível disponível para arder é o da acumulação de biomassa no local. Esta acumulação depende da produtividade primária líquida sendo primeiramente controlada pelo balanço hídrico e em seguida pela fertilidade do solo (van Wilgan e Scholes, 1997). Assim, os fogos são frequentes em ecossistemas onde existem simultaneamente combustíveis acumulados e períodos de seca (Ventura e Vasconcelos, 2006).

A extensão e duração dos efeitos dos incêndios dependem principalmente do regime do fogo e da severidade deste, que consiste em duas componentes, a intensidade, taxa a que o fogo produz energia térmica, e duração, da qual resultam maiores danos no solo. O clima, a vegetação e a topografia da área queimada, controlam a resiliência do solo (Certini, 2005).

Fogos de baixa intensidade podem modelar a floresta, destruindo pequenas árvores, rejuvenescendo vegetação rasteira tolerante ao fogo, não ocorrendo geralmente grandes mudanças no carbono do solo. Os fogos de elevada intensidade destroem a maioria das árvores e atingem a manta morta, podendo causar uma grande perda de solo, e perturbam a interação entre a vegetação e o solo durante décadas (Fisher *et al.*, 2000). No entanto, pode ocorrer a recuperação ou aumento do nível pré-fogo da maioria das propriedades, se ocorrer recolonização rápida da vegetação na área queimada (Certini, 2005).

Relativamente à propagação dos incêndios e fatores que a condicionam tendo em vista o impacto que têm no terreno, estes podem ser classificados, segundo Shakesby e Doerr (2006) como (Figura 1-1):

»Incêndios subterrâneos ou do subsolo, afetam a camada orgânica que tem origem em folhas e outras partes de plantas em decomposição. Podem avançar lentamente, produzindo incêndios de intensidade moderada.

»Incêndios superficiais ou do solo, também afetam a vegetação herbácea e arbustiva, e queimam a base e copa das árvores.

»Incêndios de copa ou aéreos queimam os ramos e folhas mais altos e podem ser dependentes do fogo de superfície ou independentes, com as chamas a propagarem-se diretamente de copa em copa.

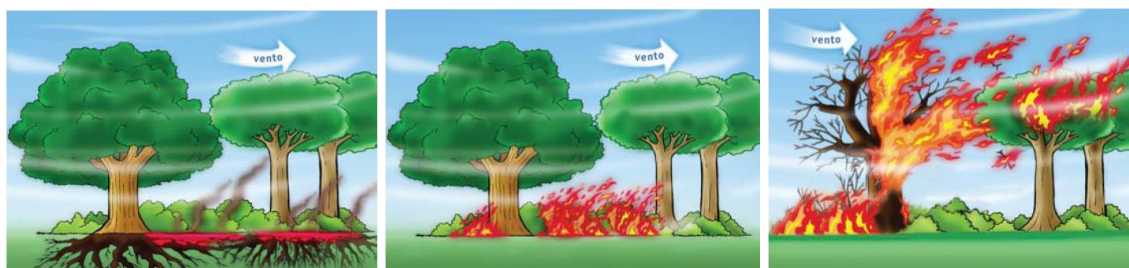


Figura 1-1 - Classificação de incêndios: a) Incêndio subterrâneo b) Incêndio superficial c) Incêndio de copa (Castro et al., 2003).

Apesar da dificuldade da identificação da origem do fogo, a maior parte dos incêndios atuais em Portugal, são causados por atividades humanas e apenas uma pequena parte ocorre devido a causas ambientais (Pereira *et al.*, 2006).

De acordo com Shakesby (2011) o recente aumento na atividade de incêndios tem sido atribuída a uma série de fatores: o aumento de verões secos nas últimas décadas, que aumenta o risco de incêndio; as mudanças socioeconómicas, incluindo despovoamento rural e abandono de práticas tradicionais de uso de terra; o aumento da área de plantação de espécies altamente inflamáveis, como por exemplo *Eucalyptus globulus*, são talvez os mais importantes.

Sendo um país pertencente à região do Mediterrâneo, a ocorrência de fogos, em Portugal, deve ser encarada como um evento natural que faz parte das características dos ecossistemas desta região. A ocorrência do fogo está associada às características da vegetação, que nalguns casos está adaptada e depende não só do clima que se verifica na região, mas também do fogo para completar o seu ciclo de vida (Palacios-Orueta *et al.*, 2002).

Existem diferenças significativas mesmo entre as regiões de clima mediterrânico. No entanto em comum está o facto de que ao longo das últimas décadas, os incêndios se terem tornado mais frequentes, mais violentos e mais devastadores. A utilização das terras gerou mais combustível e o clima aumentou o potencial de incêndios de grandes dimensões (Pyne, 2006).

A Península Ibérica tem o maior risco de incêndios da Europa. Portugal caracteriza-se por uma elevada precipitação durante o inverno, que promove o crescimento da biomassa combustível, e um verão normalmente longo, quente e seco. Esta combinação é propícia à ocorrência de incêndios (Catry *et al.*, 2007). Por esta razão, 93% da área queimada regista-se entre junho e setembro (Pereira *et al.*, 2005).

Nas últimas três décadas foram devastadas em Portugal, cerca de 100 000 hectares (ha) de área de floresta por ano (Pereira *et al.*, 2006), sendo 2003 o ano em que ocorreu o valor máximo registado, 430 000 ha de área florestal ardida (ICNF, 2013). Na Figura 1-2 pode observar-se a variação do número de ocorrências de incêndio e da área ardida, em ha, nos últimos 30 anos. A área ardida engloba áreas ardidas em povoamentos florestais e matos, enquanto o número de ocorrências engloba o número de fogachos e incêndios.

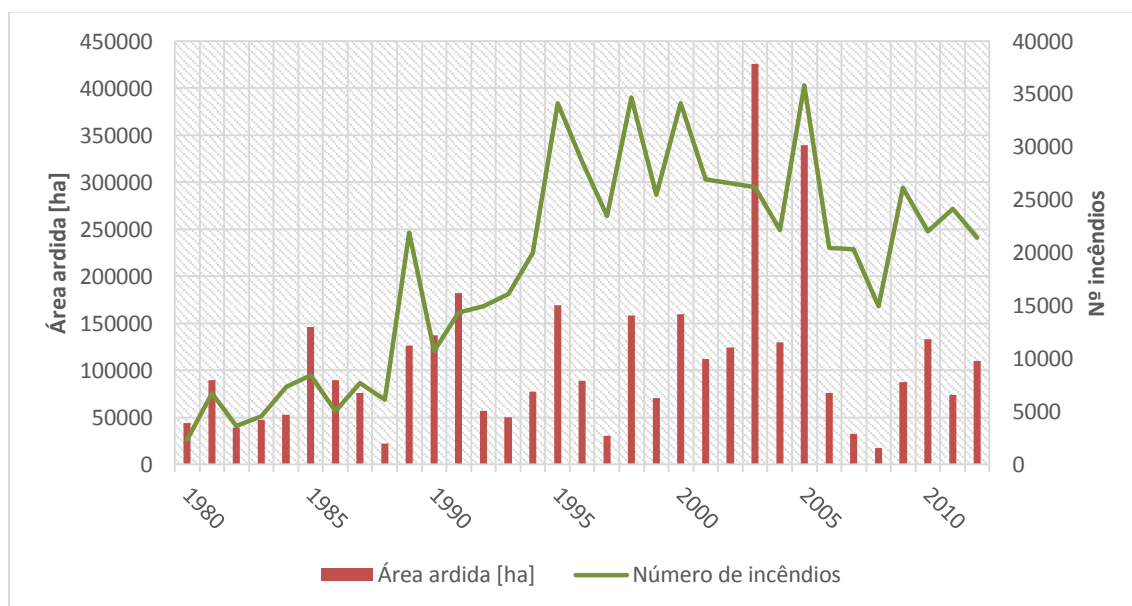


Figura 1-2 - Número de ocorrências e área ardida no período de 1980-2012 (ICNF, 2013).

É visível uma grande variação na área ardida e um aumento do número de incêndios ao longo dos anos. No futuro prevê-se o aumento de área ardida e de ocorrências de incêndio em Portugal (Carvalho *et al.*, 2010).

1.2.2. Floresta portuguesa

Segundo dados do 6º Inventário Florestal Nacional realizado pelo ICNF em 2013, o uso dominante do território continental é o uso florestal seguido de matos e pastagens, respetivamente 35% e 32% em 2010. A área de uso florestal inclui superfícies arborizadas (povoamentos florestais) e as superfícies temporariamente desarborizadas (ardidas, cortadas ou em regeneração). Durante o período de 1995 a 2010, a área florestal diminuiu 4,5% no entanto a área arborizada aumentou 6%, devido à regeneração natural e ao investimento em ações de arborização e rearborização por parte dos proprietários florestais.

Atualmente o eucalipto é a principal ocupação florestal em área (812 mil ha, 26%), o sobreiro a segunda (737 mil ha, 23%), seguido do pinheiro-bravo (714 mil ha, 23%) (ICNF, 2013). Esta composição é o resultado da intervenção do Homem na paisagem, através da conversão de áreas para a agricultura e pastoreio, utilização do fogo e corte seletivo, e a introdução de espécies de interesse económico. Isto levou a que os carvalhais fossem gradualmente substituídos por pinhais bravos e mais recentemente por eucaliptais (ARH, 2002).

O eucalipto é considerado uma espécie não indígena em Portugal. É uma espécie folhosa muito inflamável devido à grande quantidade de óleos que as suas folhas contêm. Porém está bastante adaptado ao fogo e poucas semanas após um incêndio, os eucaliptos começam a regenerar. Sendo uma espécie de crescimento rápido, recupera bastante mais depressa após o fogo do que a maior parte das espécies autóctones, como o pinheiro-bravo, que é uma espécie resinosa muito inflamável (Catry *et al.*, 2007).

1.3. Impacto dos incêndios florestais

Os incêndios florestais intervêm de forma relevante no ciclo de carbono, pelo seu papel na decomposição de material orgânico (Canadell *et al.*, 2000). Estes lançam carbono para a atmosfera na forma preponderante de CO₂, como resultado da oxidação térmica do carbono orgânico presente na biomassa dos caules, ramos e folhas. Contudo, os incêndios florestais são também causadores de emissões importantes de carbono orgânico presente no solo (Pio *et al.*, 2006).

O solo possui um papel importante na gestão da floresta, servindo como suporte para o crescimento da vegetação. Os incêndios florestais afetam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, sendo a mudança mais intuitiva que ocorre neste, a perda de matéria orgânica (Certini, 2005). Dependendo das características do ecossistema após o fogo e a

intensidade deste, a degradação estrutural do solo pode durar entre um ano e décadas (Neary *et al.*, 1999).

Os efeitos do fogo variam de acordo com fatores edáficos, clima e tipo de fogo, assim a extensão da alteração das propriedades do solo que o fogo provoca depende, segundo Thomas (1993), de 4 fatores: características do fogo, da severidade, do tipo de fogo e da duração do incêndio no solo; composição da manta morta no solo florestal que afeta a quantidade de calor produzido pelo fogo, que por sua vez controla o grau de alteração do solo; características da camada de manta morta, densidade, altura e humidade, que afetam a sua capacidade isolante e protetora; e das propriedades do solo antes do fogo, como o conteúdo em matéria orgânica, água e textura do solo.

Os incêndios florestais no norte e centro de Portugal afetam vegetação profunda e consomem, quando estas existem, as camadas L, F e H, que correspondem à camada de folhada, camada de fermentação e camada de humificação e pertencem ao horizonte O, são por isso ricas em matéria orgânica e mais vulneráveis ao fogo, devido a estarem localizados nas camadas superficiais (Ferreira *et al.*, 2005).

É possível dizer que os efeitos diretos do fogo ocorrem sobre a camada de manta morta e da vegetação, sobre o teor de matéria orgânica e na estabilidade de agregados do solo. Para além disso, o fogo afeta indiretamente as taxas de infiltração, a camada repelente de água no solo e o teor de humidade do solo. Os efeitos diretos dos incêndios no solo, em especial na matéria orgânica, variam consoante a temperatura que estes atingem (Tabela 1-1 - **Efeitos dos incêndios na MO do solo**.Tabela 1-1).

Tabela 1-1 - Efeitos dos incêndios na MO do solo.

	Intervalo de temperatura [°C]
Dissecação ou destruição das raízes (Neary <i>et al.</i> , 1999)	48 - 54
Mortalidade das sementes (Hernandez <i>et al.</i> , 2007)	70 - 90
Destilação dos compostos presentes na manta morta (Neary <i>et al.</i> , 1999)	180 - 200
Destruição de 85% da camada de manta morta (Neary <i>et al.</i> , 1999)	180 - 300
Volatilização de matéria orgânica (Lide, 2004)	200 - 315
Destruição da estrutura do horizonte orgânico (Neary <i>et al.</i> , 1999),	> 300
Destruição de quase toda a matéria orgânica (Giovannini <i>et al.</i> , 1988)	> 460

Em geral, a temperatura no solo aumenta muito lentamente, devido ao facto de que o solo seco é um bom isolador (DeBano *et al.*, 1998) e de que nos solos húmidos, a evaporação da água não permite que na camada húmida ultrapasse o ponto de ebulição da água (Campbell *et al.*, 2005).

As partículas minerais não são tão afetadas pelo fogo, porque para além de estarem situadas em camadas mais profundas, é necessário que a temperatura atinja valores elevados, entre 700 e 800 °C, o que acontece apenas em incêndios extremamente severos (Neary *et al.*, 2005).

Os efeitos indiretos dos incêndios ao nível do solo sentem-se sobretudo ao nível da superfície, devido a processos de erosão. A erosão é o resultado do desprendimento, transporte e deposição das partículas do solo. A remoção de vegetação e da camada de manta morta após incêndios florestais aumenta a escorrência superficial e a erosão do solo (Doerr e Thomas, 2000), que varia com a quantidade e sazonalidade da precipitação e da inclinação do local afetado. A cobertura vegetal é um fator chave para o ecossistema florestal, contribuindo para a diminuição da escorrência pós-fogo e diminuição da taxa de erosão de solo (Cerdá e Doerr, 2005).

Durante o incêndio são libertados outros gases que não o CO₂. O carbono libertado sob a forma de CO₂ é recuperado da atmosfera através da fotossíntese das plantas, mas o azoto libertado sob a forma de N₂O é recuperado principalmente através da atividade de organismos existentes no solo, que ao ser perturbada conduz a uma perda do potencial produtivo e, como tal, a uma diminuição na capacidade de sequestro de carbono (Pio *et al.*, 2006).

Os cenários de alterações climáticas sugerem que os regimes de incêndios se poderão intensificar no futuro em muitas regiões (Brown *et al.*, 2004), o que conduziria ao aumento de emissões a partir da queima de biomassa, com consequências negativas ao nível do *stock* e fluxo de carbono dos ecossistemas terrestres. Este cenário pode afetar negativamente os compromissos internacionais no que se refere ao controlo de emissões de gases com efeito de estufa e outras substâncias poluentes (Pereira *et al.*, 2002).

1.4.A movimentação de carbono no solo

1.4.1. O ciclo de carbono

Segundo Lal *et al.* (1998) a pedosfera situa-se na interface entre a litosfera e a atmosfera. É a camada mais externa da superfície terrestre e serve de suporte às atividades bióticas dos ecossistemas terrestres, interagindo com a atmosfera, litosfera, biosfera e hidrosfera, o que influencia os ciclos biogeoquímicos dos principais elementos.

O carbono (C) é um constituinte integrante da estrutura celular de todos os seres vivos. Por esta razão, o ciclo de carbono é um dos ciclos biogeoquímicos mais importantes na Terra, agindo de certa maneira como uma força motriz para os outros ciclos (Stevenson e Cole, 1999). Os processos mais importantes neste ciclo são as interações que envolvem a pedosfera, atmosfera e a biosfera. Por isso, os principais reservatórios de carbono da Terra são o oceânico, o atmosférico e o terrestre, que engloba a vegetação e o solo, e que se encontram em constante equilíbrio dinâmico, interagindo e trocando C entre eles (Figura 1-3). Outro reservatório importante são as formações geológicas que contêm carbono fóssil e mineral (Machado, 2005).

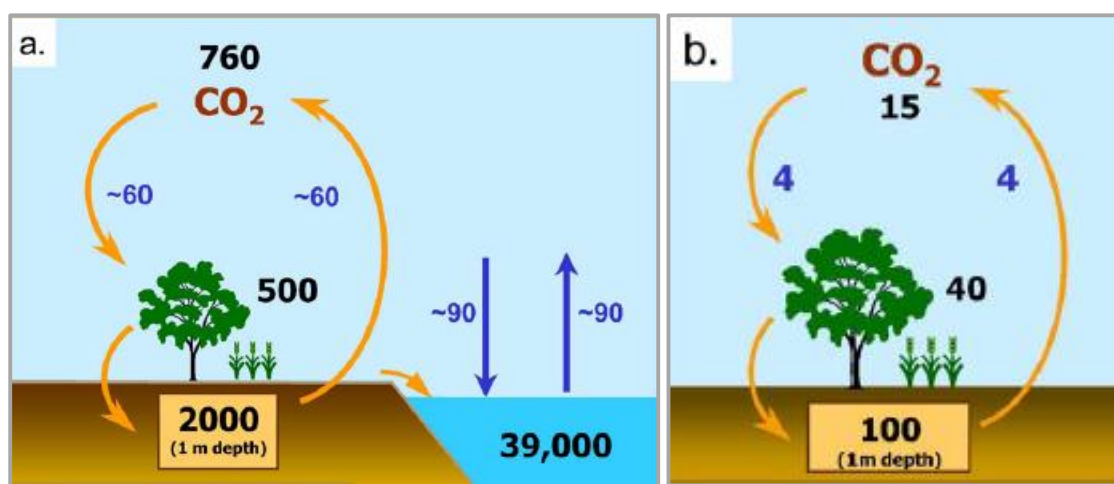


Figura 1-3 - a) Stock (Pg C^1) e fluxos (Pg C por ano) do ciclo global de carbono b) Stock (Mg C.ha^{-1}) e fluxos ($\text{Mg C.ha}^{-1} \text{ por ano}$) de carbono expressos como média por ha de área continental (Janzen, 2004).

O ciclo de carbono é dividido em três fases segundo Cerri *et al.* (1992): a fase de organização do C atmosférico, realizada principalmente pelos vegetais fotossintetizantes; a fase de liberação dos produtos fotossintetizados e da sua acumulação e estabilização no solo; e a fase de mineralização de substratos orgânicos e de transferência de C para a atmosfera; sendo que a maior parte da 2ª e da 3ª fase ocorrem no solo, constituindo o ciclo interno do carbono.

Durante longos períodos de tempo, o armazenamento de carbono no solo varia principalmente como resultado de fatores climáticos, geológicos e de formação de solo (Adams *et al.*, 1990), enquanto em períodos mais curtos, são principalmente distúrbios e sucessão da vegetação, e mudanças nos padrões de uso da terra que afetam o seu armazenamento (Batjes, 1996).

¹1 Petagrama (Pg) equivale a 10^{12} kg e 1 Megagrama (Mg) equivale a 10^6 kg.

A capacidade de armazenamento de carbono no solo é determinada pelo equilíbrio dinâmico entre os processos de entrada e saída de carbono, destes destacam-se dois processos fundamentais, entrada de C proveniente da produção de biomassa de carbono primário, humificação, e saída através da mineralização (Kogel-Knabner *et al.*, 2008; da Costa, 1999):

»**Humificação** é um processo do qual se originam complexos coloidais relativamente estáveis e resistentes à decomposição e onde ocorre a formação de substâncias húmicas. Existe uma vasta combinação dos vários fatores de que depende este processo, principalmente a natureza biológica do meio, composição do material originário e características físico-químicas e microclimáticas do solo. Isto permite a formação de diversos tipos de matéria orgânica.

»**Mineralização**, ou decomposição, é um processo de destruição que conduz à desorganização da estrutura dos resíduos e lentamente à transformação dos seus constituintes em compostos mais simples, em geral solúveis ou gasosos, realizada por organismos presentes no solo. A velocidade de decomposição depende principalmente da relação C/N e das condições ambientais, como a temperatura, humidade e pH do solo, sendo mais lenta em climas frios (DeBano *et al.*, 1998). Durante este processo uma proporção variável de carbono orgânico, entre 60 a 80%, é libertada para atmosfera como CO₂ (González-Pérez *et al.*, 2004). A matéria orgânica produzida por raízes pode-se concentrar nas camadas superficiais do solo ou acumular-se em profundidade em solos florestados. O ambiente radicular, também denominado rizosfera, também proporciona um ambiente favorável para microrganismos presentes no solo, sendo por isso um importante local de atividade microbiana (DeBano *et al.*, 1998).

Na movimentação de C no solo, existem mais processos, como a agregação e sedimentação (Stevenson e Cole, 1999) que atuam como processos de entrada devido à retenção de C no solo, e a erosão, decomposição, volatilização e lixiviação (Lal *et al.*, 1998), como processos de saída e são responsáveis pela perda de C no solo (Figura 1-4). A sedimentação é um fenómeno que pode enterrar no solo enormes quantidades de carbono orgânico, cerca de 10¹² kg.ano⁻¹ (Stallard, 1998).

A fixação biológica de CO₂ ou fotossíntese, que produz compostos orgânicos, é denominada de produção primária bruta. Após perdas pela respiração, crescimento e manutenção, a biomassa recém-formada é denominada produção primária líquida (PPL). A produção secundária líquida ocorre quando consumidores como herbívoros ou decompositores da PPL produzem uma nova biomassa. A decomposição da PPL leva à preservação seletiva de alguns constituintes resistentes das plantas, tais como a lignina. Além disso, a atividade dos microrganismos produz compostos

precursores da matéria orgânica do solo, que são resistentes à deterioração e podem persistir por anos (Chesworth, 2008).

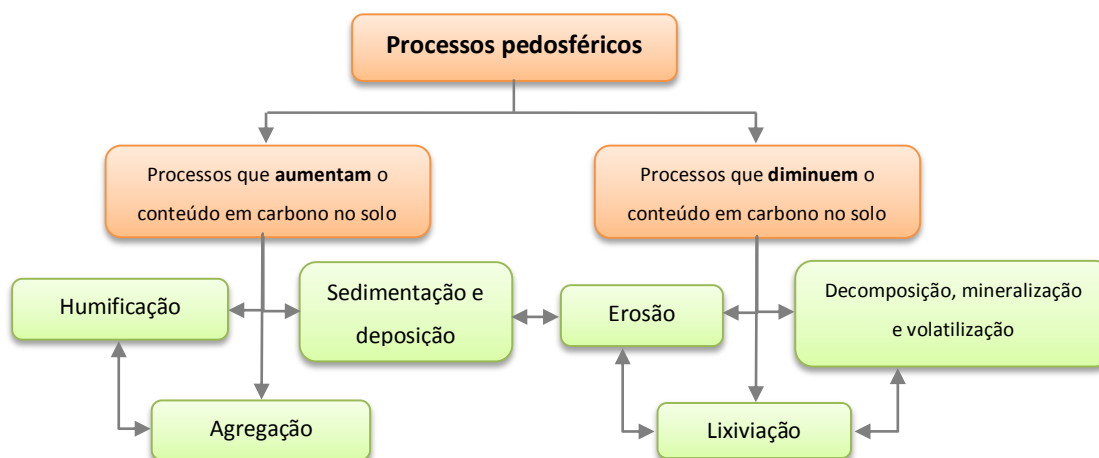


Figura 1-4 - Principais processos que influenciam o conteúdo em carbono no solo (Machado, 2005).

1.4.2. O carbono no solo

O solo é um recurso vital, essencialmente não renovável, com taxas de degradação potencialmente rápidas e processos de formação e regeneração extremamente lentos (CE/UE, 2002). O solo florestal desenvolve-se sob a influência de um coberto florestal e arbustivo com uma camada orgânica, como consequência do enraizamento profundo durante longos períodos e de organismos específicos associados à vegetação da floresta.

A sua constituição varia verticalmente desde a camada superficial até à rocha-mãe, no que se denomina a génese do solo. Na maior parte dos casos o solo é constituído por matéria mineral sólida, à qual, está associada matéria orgânica até uma profundidade variável. A cor escura típica de muitos solos é causada pela matéria orgânica (Bohn *et al.*, 2002). Ao realizar um corte vertical no solo, expõe-se camadas com diferentes características que têm a designação de horizontes do solo (Figura 1-5) e constituem o perfil do solo. Estas camadas são classificadas por ordem de profundidade de O, A, B, C e R (de rocha-mãe), existindo subdivisões para uma caracterização mais específica e são distinguidas através de propriedades como a cor, a textura e a estrutura (Neary *et al.*, 2005).

O solo tem uma capacidade considerável de armazenamento e efeito tampão, estreitamente relacionada com a sua carga de matéria orgânica. Isto aplica-se não só à água, aos minerais e aos gases, mas também a um grande número de substâncias químicas contaminantes (CE/UE, 2002).

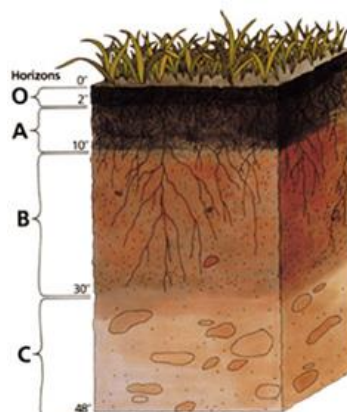


Figura 1-5 - Exemplo da distribuição de horizontes no solo (USDA, 2013).

O termo matéria orgânica do solo (MOS) é usado para descrever os constituintes orgânicos no solo, isto é, produtos da decomposição de organismos vegetais, animais e biomassa microbiana, sendo considerada uma mistura altamente complexa e heterogénea (Knicker, 2007). A composição de matéria orgânica varia de acordo com a sua fonte, e consiste em dois tipos de compostos: substâncias não-húmicas e substâncias húmicas. As primeiras são representadas por compostos orgânicos conhecidos como hidratos de carbono, gorduras, ceras e proteínas. As substâncias húmicas, que representam a maior fração (até 80%) e a mais ativa da matéria orgânica, consistem numa série de moléculas de alto peso molecular com caráter ácido, designados por ácidos húmicos, ácidos fúlvicos entre outros (Stevenson e Cole, 1999). A estrutura da MOS consiste em aproximadamente 50-55% de carbono, 5% hidrogénio, 33% oxigénio, 4,5% azoto e 1% de enxofre e fósforo. Adicionalmente, metais e nutrientes, como o cálcio, zinco e cobre, estão presentes em quantidades mais pequenas (Chesworth, 2008). A MOS tem um papel importante no solo, mantém a sua integridade, abastecendo-o de nutrientes e sustentando a atividade microbiana. Em áreas florestais, encontra-se sobretudo à superfície do solo e a contribuição da manta morta é maior do que a das raízes. A taxa de rotatividade de carbono orgânico depende principalmente da quantidade e atividade da biomassa microbiana no solo (Knicker, 2007).

O carbono orgânico do solo (COS) refere-se ao carbono presente na matéria orgânica e é uma medida da quantidade total de carbono orgânico no solo, independentemente da sua origem ou decomposição. A determinação do carbono orgânico total é presentemente o método que permite a determinação mais rigorosa da MOS (da Costa, 1999). É comum o interesse no estudo do carbono orgânico pela sua importância nas principais funções ecológicas, físicas, químicas e biológicas do solo, e porque é considerado um indicador universal de qualidade do solo (Stolbovoy *et al.*, 2007). Os solos contêm carbono na forma orgânica e inorgânica. Na maior

parte dos solos, à exceção de solos calcários, a maioria do C, cerca de 70%, é tida como carbono orgânico do solo. O carbono inorgânico no solo está normalmente presente em minerais carbonatados, como o carbonato de cálcio (CaCO_3) e dolomite (MgCO_3) (Batjes, 1996).

A quantidade de carbono orgânico do solo em ecossistemas de áreas florestais depende de fatores naturais, como o clima, é comum o conteúdo em COS ser maior em áreas de precipitação elevada, a topografia, o conteúdo em COS é geralmente maior em áreas de maior altitude, e distúrbios florestais naturais, bem como de fatores antropogénicos, pois a capacidade dos solos para capturar COS é largamente afetada pelo uso da terra e, mudanças e gestão do uso da terra (Dela Cruz, 2010).

Para além disso a concentração de carbono orgânico no solo está correlacionada com a textura do solo e vegetação (da Costa, 1999), indicando que a melhoria das propriedades de estrutura do solo é importante para o sequestro de carbono (Nipithwittaya e Sampanpanish, 2012). O grau de perda de matéria orgânica e da compactação do solo da floresta, influencia diretamente a taxa de meteorização de minerais e de mineralização de nutrientes e, conseqüentemente, a taxa de crescimento da vegetação (Arocena, 2000). Excetuando o CO_2 , hidrogénio sob a forma de H_2O e oxigénio como O_2 , as plantas obtêm os seus elementos essenciais a partir do solo. Pequenas exceções ocorrem com o azoto e gases de enxofre que são absorvidos diretamente da atmosfera pelas folhas (Bohn *et al.*, 2002).

A diversidade e a atividade de microrganismos do solo estão diretamente relacionadas com o nível de matéria orgânica presente e pela sua qualidade. Para além de ser um reservatório de nutrientes essenciais à vegetação, possuiu qualidades que contribuem diretamente para o crescimento da vegetação e microbiano, através da sua influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A associação de MOS com minerais secundários como argila e óxidos amorfos cria uma estrutura de solo através da formação de agregados. A formação de agregados melhora a estrutura física do solo, promovendo a taxa de infiltração e a capacidade de solo para reter a água, bem como a resistência da superfície à erosão eólica e hídrica (Chesworth, 2008).

Ao longo dos anos foram realizadas várias estimativas para o conteúdo global em C no solo, no entanto, é necessário ressaltar a incerteza nestes estudos, devido à variabilidade espacial e temporal do C armazenado e também a diferenças na metodologia de amostragem e laboratorial (Batjes, 1996). Na pedosfera, o *stock* de carbono do solo global, na profundidade de 1 metro, foi estimada em 1,55 Pg, cerca de 75% do stock total de carbono no ecossistema

terrestre, que equivale a quase três vezes a biomassa que se encontra acima do solo e o dobro do *stock* de carbono atmosférico (Post *et al.*, 1982; Eswaran *et al.*, 1993). Relativamente ao *stock* global de carbono orgânico do solo, existe cerca de 1,50 Pg a uma profundidade de 3 metros (Jobbágy e Jackson, 2000), o que corresponde a uma grande proporção quando comparado com o carbono total do solo. Há, todavia, um limite para a quantidade de matéria orgânica e, logo, de carbono que pode ser armazenado nos solos (CE/UE, 2002). Pode-se então considerar que o solo é o maior reservatório de carbono global e um importante sumidouro de CO₂ atmosférico, e que o COS desempenha um papel importante na mitigação de gases com efeito estufa.

1.5. Objetivos e estrutura da tese

O principal objetivo deste trabalho é estudar os efeitos dos incêndios florestais no carbono orgânico de vários solos florestais na região Norte Centro de Portugal.

O estudo irá centrar-se na quantificação e distribuição do conteúdo em carbono orgânico na superfície do solo integrado no projeto FireCNuts, o que irá permitir uma apreciação mais profunda dos efeitos do fogo sobre o solo das florestas portuguesas.

Mais especificamente os seus objetivos são:

- » Inferir sobre as reservas de carbono orgânico na camada superficial do solo após ocorrência de incêndios.
- » Avaliar o efeito da ocorrência de incêndios nos padrões sazonais do conteúdo em carbono orgânico em solos florestais.
- » Comparação do impacto do incêndio ao nível do carbono orgânico do solo, em encostas com diferente coberto vegetal e diferente geologia.
- » Estudar o efeito do fogo nas reservas de carbono na camada superficial do solo, ao nível do carbono orgânico, comparando encostas queimadas com uma encosta não queimada.
- » Avaliar a variabilidade espacial do carbono orgânico numa das encostas estudadas.

A dissertação encontra-se dividida em três capítulos. O capítulo 1, já apresentado, introduz a importância do estudo e sua problemática, seguindo-se a abordagem teórica dos diferentes âmbitos deste, com ênfase nos incêndios florestais, no ciclo do carbono e como estes afetam o solo. O capítulo 2, redigido em formato de artigo científico, contempla a descrição da área em estudo, a metodologia aplicada na recolha de amostras, análises laboratoriais, os resultados

obtidos, a sua discussão e principais conclusões. No capítulo 3 são retiradas as considerações finais e indicadas algumas recomendações para futuros trabalhos.

2. Capítulo – IMPACTO DO FOGO NO CARBONO ORGÂNICO EM SOLOS DO CENTRO DE PORTUGAL

A. Heitor^a, M. E. Varela^{a,b}, V. Esteves^{b,c}, J. J. Keizer^{a,b}

^a Departamento do Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

^b Centro de Estudos do Ambiente e do Mar

^c Centro de Estudos do Ambiente e do Mar, Departamento de Química, Universidade de Aveiro

Resumo

O solo é considerado o maior reservatório de carbono global e um importante sumidouro de CO₂ atmosférico. Na maior parte dos solos, a maioria do carbono é tida como carbono orgânico. Os incêndios florestais são um fenómeno frequente nos ecossistemas mediterrânicos, em especial em Portugal. Nas últimas décadas verificou-se um aumento do número de incêndios e os cenários de alterações climáticas sugerem que os regimes de incêndios se poderão intensificar no futuro. Os fogos florestais têm associados vários impactos ambientais, pelos seus efeitos sobre as características físicas e químicas do solo, entre outros. Estes efeitos variam consoante a temperatura que o fogo atinge, alterando as propriedades do solo no espaço e no tempo após o fogo. É comum o interesse no estudo do carbono orgânico do solo devido à sua importância nas principais funções do solo e por ser um indicador universal da qualidade deste. Neste trabalho foi estudado o conteúdo de carbono orgânico no solo numa área no concelho de Sever do Vouga, na região centro norte de Portugal, que ardeu durante o verão de 2010. Pretende-se avaliar o *stock* de carbono após o incêndio, estudar padrões temporais e espaciais, avaliar o impacto do fogo em encostas com diferente geologia e cobertura vegetal e inferir sobre a variabilidade espacial numa encosta. Para tal, foram selecionadas 5 encostas dentro da área ardida, com duas espécies florestais, eucalipto e pinheiro bravo, e dois tipos de geologia, granito e xisto. Para referência foi igualmente estudada uma encosta não queimada próxima da área de estudo, plantada com eucalipto sobre rocha-mãe de xisto. Foram recolhidas e analisadas amostras de cinza e manta morta e amostras de solo a duas profundidades, de 0 a 2 cm e de 2 a 5 cm, referentes aos primeiros dois anos após o incêndio, num total de 296 amostras. Na determinação do carbono orgânico total foi utilizado um Analisador TOC-V CPH equipado com um amostrador de sólidos SSM-5000A devidamente calibrado. A concentração de carbono é ligeiramente superior em solos sob rocha-mãe xisto do que em solos de granito, e também ligeiramente superior, em eucaliptais do que em pinhais. Após o incêndio existe um aumento

de carbono orgânico no solo, que sugere a incorporação de biomassa florestal queimada no solo. A variabilidade espacial entre pontos numa mesma encosta mostra que cada transepto representa a heterogeneidade da encosta.

Palavras-chave: Incêndios florestais, *stock* de carbono (ou reserva de carbono), carbono orgânico, solo.

2.1. Introdução

Considerada a maior reserva de carbono orgânico terrestre na biosfera, o solo contém mais carbono do que a biomassa acima do solo e a atmosfera combinados (Schlesinger, 1997). O *stock* global de carbono orgânico no solo foi estimado por alguns autores (Post *et al.*, 1982; Eswaran *et al.*, 1993; Batjes, 1996), sendo que 75% deste encontra-se em florestas (Janze, 2004).

Os solos têm a capacidade de armazenar carbono durante longos períodos de tempo e, entre os ecossistemas florestais, o *stock* de carbono possui o maior tempo de residência (Dela Cruz, 2010). Pequenas alterações no *stock* do solo de carbono podem modificar significativamente a concentração atmosférica de CO₂ tendo por isso, um papel importante no estudo das alterações climáticas. Para além disso, é essencial um nível adequado de carbono orgânico no solo, de modo a diminuir a erosão e os riscos de degradação e, aumentar a capacidade do solo em reter água e facilitar a troca de nutrientes, com vista à melhoria da estrutura do solo (Lal, 2004).

Os incêndios florestais são uma grande ameaça para as florestas do Mediterrâneo, em especial Portugal, onde o número de incêndios está a aumentar (ICNF, 2013). A consequência mais intuitiva dos incêndios florestais é a perda parcial ou completa da biomassa acima do solo, no entanto, estes incêndios têm um impacto significativo no solo (Certini, 2005), afetando particularmente, a sua componente orgânica, quantitativa e qualitativamente. As alterações induzidas pelo fogo, na fração orgânica do solo, foram revistas por González-Pérez *et al.* (2004) e Knicker (2007).

Estes fenómenos produzem importantes impactos ambientais, que derivam em parte de efeitos a curto e médio prazo sobre as propriedades, composição e dinâmica da matéria orgânica do solo. Este é um aspeto que tem merecido atenção nos últimos anos devido ao crescente debate das alterações climáticas. No entanto, pouco se sabe sobre os efeitos do fogo sobre a matéria orgânica no solo e consequentemente sobre o carbono orgânico do solo, principalmente sobre as mudanças quantitativas e qualitativas que provocam na sua dinâmica e consequentemente, na saúde geral do solo.

Este estudo, cuja recolha e análise de dados foi desenvolvida no âmbito do projeto FIRECNUTS (Efeitos de fogos florestais na quantidade e dinâmica de carbono e nutrientes no solo e na sua exportação por escorrência superficial) PTDC/AGR-CFL/104559/2008, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal, centrou-se no estudo dos efeitos de incêndios florestais ao nível do carbono orgânico do solo, numa área ardida no centro norte de Portugal. Pretende-se portanto, inferir sobre as reservas de carbono orgânico na camada superficial do solo após ocorrência de incêndios, estudar padrões temporais e no conteúdo em carbono orgânico em solos florestais, avaliar o impacto do fogo na camada superficial do solo e comparar este impacto ao nível do carbono orgânico do solo em encostas com diferente coberto vegetal e diferente geologia, e por fim avaliar a variabilidade espacial do carbono orgânico numa das encostas estudadas.

2.2. Materiais e métodos

2.2.1. Área de Estudo

A área de estudo situa-se no lugar de Ermida, freguesia de Sever do Vouga pertencente ao concelho de Sever do Vouga ($40^{\circ}43'N$ $8^{\circ}20'O$), distrito de Aveiro no centro norte de Portugal (Figura 2-1). A escolha da área de estudo deve-se a um incêndio florestal ocorrido a 26 de julho de 2010, com reacendimentos e apenas extinto no dia 31 de julho de 2010, que consumiu 295 hectares (ICNF, 2010). A Figura 2-1 representa a localização das encostas estudadas, a que correspondem as letras a vermelho e o limite da área ardida que corresponde a linha laranja.

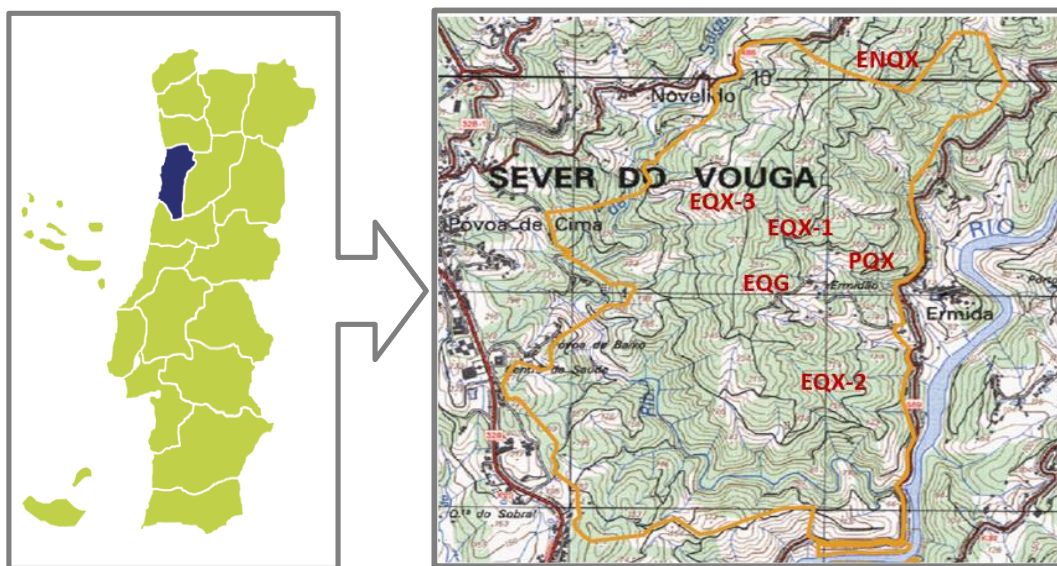


Figura 2-1 - Localização da área de estudo e diferentes encostas.

Segundo a classificação climática de Köppen (Köppen, 1936), o clima das estações da bacia, na qual se insere a área de estudo, é do tipo Csb, isto é, mesotérmico (temperado) húmido, com um verão seco, moderadamente quente mas extenso (ARH, 2002). Esta classificação é caracteristicamente mediterrânica, com influência oceânica.

A temperatura média anual é de 14 °C, variando entre 12,1 °C e 16,3 °C, enquanto, que as médias mensais atingem um mínimo de 4,8 °C e um máximo de 24,5 °C, valores obtidos a partir da estação climatológica de Barragem de Castelo Burgães (40°85'N 8°38'O) (SNIRH, 2012). A precipitação média anual é 1655 mm e varia entre 960 mm e 2531 mm, valores obtidos a partir da estação meteorológica de Ribeiradio (40°74'N 8°30'O) (SNIRH, 2012).

Antes do fogo, a vegetação nas encostas de estudo era predominantemente constituída por Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) ou Pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.). Como a vegetação arbustiva e rasteira e a camada de manta morta foram consumidas quase por inteiro, para além da cor preta das cinzas, a severidade do incêndio aparenta ter sido moderada. Os solos da área de estudo variam entre cambisolos e leptosolos (WRB, 2006) sob rocha-mãe de granito ou xisto (Tabela 2-1 - **Características gerais das encostas estudadas**.Tabela 2-1).

Todas as encostas apresentam um relevo acidentado, com declive superior a 20 °. A classe de textura na camada superficial varia conforme a encosta é por norma franco-arenoso ou franco-argiloso-arenoso. Relativamente à densidade aparente não existe uma diferença significativa entre encostas, com valores que variam entre 0,7 e 0,9 g.cm⁻³, sendo a única exceção a encosta EQX-2 que apresenta densidade de 1,2 g.cm⁻³.

2.2.2. Desenho experimental

Com vista ao objetivo do trabalho, a área de estudo foi monitorizada durante dois anos após o incêndio, com exceção de EQG e EQX-1, que foram alvo de reflorestação, o que implicou a construção de terraços nas encostas, tendo sido monitorizadas durante apenas seis meses.

As encostas estudadas foram selecionadas no âmbito do projeto FireCNuts, tendo em conta o declive e a vegetação predominante de cada uma e com vista à comparação entre encostas com as mesmas características. Adicionalmente foi selecionada uma encosta não queimada, perto da área afetada pelo fogo, para efeito de controlo.

Apesar de não estar presente em todas as recolhas de solo, todo o processo de pré-tratamento das amostras e análise foi realizada pela autora.

Tabela 2-1 - Características gerais das encostas estudadas.

Encosta	EQG	EQX-1	PQX	EQX-2	EQX-3	ENQX
Espécie florestal predominante	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.
Rocha-mãe	Granito	Xisto	Xisto	Xisto	Xisto	Xisto
Classe de solo	Cambisol	Cambisol	Cambisol	Leptosol	Cambisol	Leptosol
Altitude [m]	222	223	151	183	200	257
Orientação	SE	S	SE	N	SO	SE
Declive [°]	25,6 ± 4,4	24,0 ± 6,0	23,0 ± 2,4	20,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	25,0 ± 3,5
Comprimento [m]	77	48	35,5	60	90	31,5
Densidade aparente [g/cm³]	0,71	0,78	0,73	1,15	0,88	0,88
Areia [%]	61,3	44,7	53,6	67	71	72
Limo [%]	24,3	33,8	25,1	9	10	22,6
Argila [%]	14,4	21,5	21,3	24	18	5,3
Classe de Textura	Franco-arenoso	Franco	Franco-argiloso-arenoso	Franco-argiloso-arenoso	Franco-arenoso	Franco-arenoso

2.2.3. Recolha de amostras de solo

Para a recolha de solos realizou-se um transepto vertical desde a base até ao topo da encosta, constituído por cinco pontos equidistantes, de modo a conseguir-se uma caracterização global da encosta (Figura 2-2). O primeiro ponto de amostragem corresponde à base da encosta e o último ao topo desta (Figura 2-2a). As amostras são acondicionadas e transportadas para o laboratório em sacos de plástico.

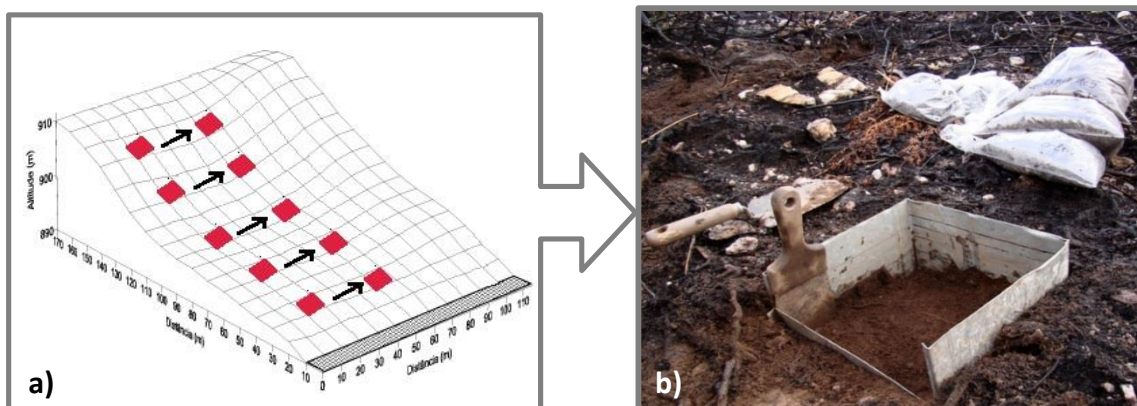


Figura 2-2 - a) Desenho experimental. b) Exemplo da amostragem de solo.

Nas encostas queimadas delimitou-se uma área de 50 x 50 cm para recolha das cinzas, após a qual se delimitou uma área de 25 x 25 cm para recolha de solos a duas profundidades, de 0 a 2 cm e de 2 a 5 cm, em cada ponto de amostragem. Na encosta não queimada delimitou-se uma área de 25 x 25 cm para recolher a camada de manta morta e posterior recolha de amostras de solo na profundidade de 0 a 2 cm e de 2 a 5 cm, em cada ponto de amostragem. A análise de cinzas e manta morta foi realizada apenas para o 1º mês após o fogo.

Na encosta EQX-1, realizou-se uma amostragem 6 meses após o incêndio para o estudo em detalhe da variabilidade espacial do conteúdo em COS, onde se recolheram amostras em 18 pontos ao longo da encosta, nas profundidades de 0 a 2 e de 2 a 5 cm.

A recolha de amostras de solo teve início no 1º mês após o incêndio, repetindo-se o processo de 6 em 6 meses até perfazer dois anos, com exceção das encostas EQG e EQX-1, como referido anteriormente. A Tabela 2-2 representa o calendário de recolha das amostras efetuada ao longo do período de estudo. No total foram recolhidas e analisadas 296 amostras, entre solo, cinzas e manta morta.

Tabela 2-2 - Calendário de recolha de amostras de solo após o incêndio.

	1 Mês	6 Meses	12 Meses	18 Meses	24 Meses
EQG	✓	✓			
EQX-1	✓	✓			
PQX	✓	✓	✓	✓	✓
EQX-2	✓	✓	✓	✓	✓
EQX-3	✓	✓	✓	✓	✓
ENQX	✓	✓	✓	✓	✓

2.2.4. Análise laboratorial

A textura do solo foi determinada através do método internacional da análise mecânica seguindo a classificação USDA (SSS, 1975) e a densidade aparente foi determinada a partir das amostras de solo recolhidas em cilindros, de volume conhecido, para não alterar a sua estrutura, posteriormente é determinada a massa por secagem a 105 °C durante 24 horas.

As amostras de solo foram secas ao ar e posteriormente peneiradas, utilizando crivos com malhas de 2 mm de diâmetro de modo a remover pequenas pedras e raízes. A fração menor que 2 mm foi então triturada, utilizando um moinho Retsch RM200, até se obter um pó fino. Esta preparação é importante para uma melhor homogeneização da amostra e porque as reações envolvidas na análise laboratorial são mais eficientes quando as partículas da amostra são de menor dimensão, devido à maior área superficial de contato.

O teor de carbono total é a soma de carbono orgânico e carbono inorgânico, para a sua determinação foi utilizado um analisador Shimadzu com dois módulos, o TOC-V CPH de combustão húmida (Figura 2-3a) e o SSM-5000A de combustão seca (Figura 2-3b). O SSM-5000A faz a análise de carbono total e também de carbono inorgânico das amostras sólidas e, pela diferença das duas quantidades obtém-se o carbono orgânico. A quantificação de carbono é determinada através da deteção do CO₂ formado, por um detetor de infravermelhos não dispersivo (NDIR, Nondispersive infrared sensor), ver Anexo I (Shimadzu Corporation, 2009).

As amostras são pesadas utilizando uma microbalança, transferidas para um cadinho e em seguida inseridas no equipamento. De modo a reduzir o impacto da contaminação externa, é necessário uma quantidade de amostra próxima do limite superior da quantidade de carbono que deve ser medido pelo equipamento, 30 mg. Através do analisador TOC Shimadzu, é possível

obter análises rápidas e altamente reprodutíveis, sendo este equipamento extremamente automatizado.



Figura 2-3 - a) TOC-V CPH de combustão húmida. b) SSM-5000A de combustão seca.

2.2.4.1. Análise de carbono

O **Carbono Total (CT)** foi determinado através da oxidação da amostra à temperatura de 900 °C, na presença de um catalisador de platina coberto por óxido de alumínio e numa atmosfera rica em oxigénio, com pureza de 99,9%, de modo a garantir a oxidação completa dos componentes gasosos. A esta temperatura, todo o carbono presente na amostra é volatilizado e reage com o oxigénio do ar, formando CO₂. Após a combustão, o CO₂ percorre o sistema até à célula de deteção, onde é medida a absorvência na gama dos infravermelhos (Shimadzu, 2009).

O sinal de deteção de CO₂ ocorre em função da quantidade e do tempo que o CO₂ flui na célula do detetor. O resultado é um gráfico como mostra a Figura 2-4.

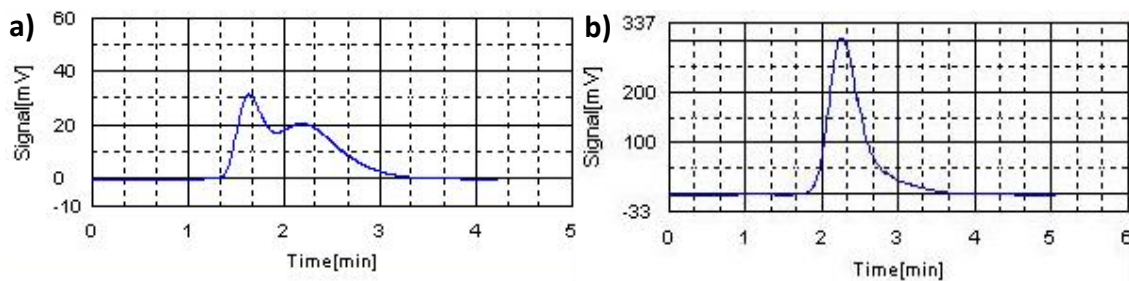


Figura 2-4 - Curvas típicas da análise de CT: a) amostra de solo b) amostra de glucose.

Da integração desta banda, ou seja, do cálculo da área abaixo da curva obtém-se a concentração de CO₂, que por sua vez é proporcional ao conteúdo em carbono da amostra (Shimadzu, 2009).

Na determinação de **Carbono Inorgânico (CI)** a amostra é acidificada com uma solução de ácido ortofosfórico (H_3PO_4), um ácido inorgânico extremamente solúvel em água com ponto de fusão em $42,35^\circ\text{C}$ (anidro) e ponto de ebulição em 158°C . Para a diluição é utilizada água ultra pura na razão 1:2 em v/v. A amostra é então aquecida à temperatura de 200°C transformando os carbonatos e hidrogenocarbonatos presentes na amostra em CO_2 . Após a acidificação a quantificação de CO_2 formado é determinado por meio do método de detecção infravermelho não dispersivo.

Ao longo de análises realizadas verificou-se que os valores obtidos para a quantidade de CI presente nas amostras de solo, foram inferiores ao limite de detecção do método de análise, considerando-se desprezável o conteúdo em CI. Sendo assim a quantidade de CO nessa componente foi calculado a partir da fórmula (1) simplificada:

$$\text{Carbono Orgânico Total (COT)} = \text{Carbono Total (CT)} \quad (1)$$

2.2.4.2. Retas de calibração

Para a garantia da qualidade analítica dos resultados do módulo de determinação de carbono em amostras sólidas, procedeu-se a uma calibração do método de análise, utilizando como padrão a glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) para o CT e carbonato de sódio (Na_2CO_3) para o CI. A reta de calibração é criada a partir da quantidade de carbono e não da concentração. Obteve-se então as equações de reta ($y = bx + a$) e os respetivos coeficientes, linear (a), angular (b) e de correlação (R^2). A Figura 2-5 representa a reta de calibração utilizada na determinação de CO, preparada a partir de padrões com concentração na gama de 0 a 30 mg C.

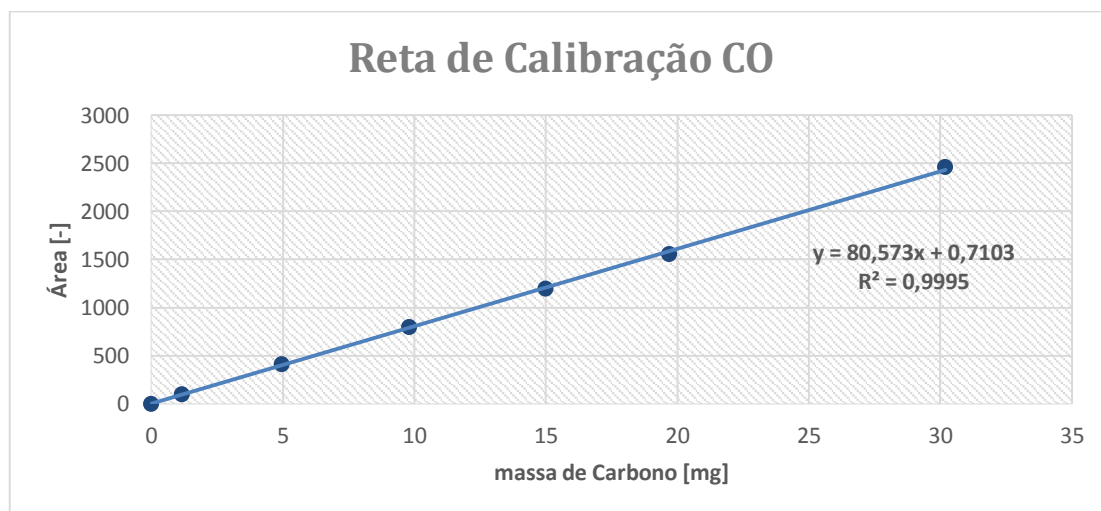


Figura 2-5 - Reta de calibração para a análise CO.

Para verificar a validade da reta de calibração de CO, analisou-se uma amostra de glucose no início de cada sessão de trabalho. A calibração em vigor é aceite se o desvio, entre o valor obtido e o previsto para o padrão, não for superior a 5%.

A Figura 2-6 representa a reta de calibração utilizada na determinação de CI, preparada a partir de padrões com concentração na gama de 0 a 10 mg C.

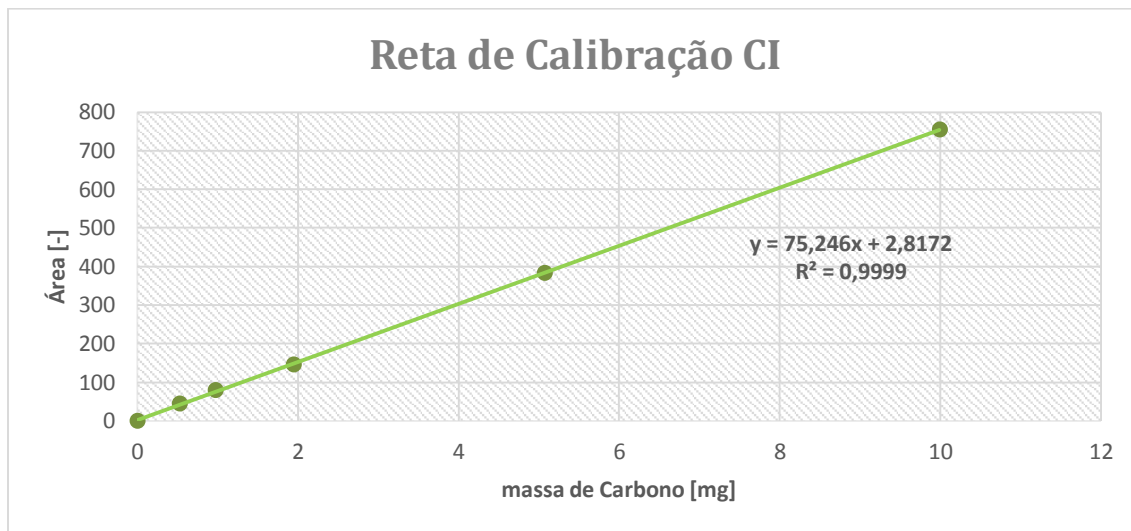


Figura 2-6 - Reta de calibração para a análise CI.

2.2.4.3. Limites de Detecção e de Quantificação

Para um determinado procedimento experimental, o limite de deteção (LD) representa a quantidade mínima do analito que pode ser detetada, enquanto o limite de quantificação (LQ) representa a quantidade mínima do analito que pode ser quantificada. Ambos os limites (Tabela 2-3) foram determinados matematicamente pela relação entre desvio padrão da curva de calibração e sua inclinação, através do método descrito por Miller e Miller (2005).

Tabela 2-3 - LD e LQ por reta de calibração.

	Gama de padrões [mg C]	LD [mg C]	LQ [mg C]	R ²	Equação de reta
CO	0 - 30	0,7638	2,5459	0,9995	$y = 80,573 x + 0,7103$
CI	0 - 10	0,1339	0,4463	0,9999	$y = 75,246 x + 2,8172$

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Stock de carbono orgânico no solo

Relativamente à concentração de carbono no solo (Tabela 2-4), a camada de manta morta na encosta de controlo apresenta o valor mais alto, 46% de carbono, seguido da camada de cinzas nas encostas queimadas, com valores entre 25 e 35% de carbono. Valores mais baixos de concentração de carbono na camada de cinzas sugerem que o incêndio tenha consumido com mais intensidade a biomassa florestal, ou seja tenha sido mais severo. A fração de elementos grosseiros, fração maior que 2 mm que não foi analisada, na camada de cinzas, em grande parte carvão, representou em média cerca de 30% da massa total recolhida. A camada de cinzas pode representar uma reserva importante de carbono pós-fogo, além disso a maior parte de carbono nesta camada é de natureza pirogénica, o que lhe confere elevada resistência à degradação, de modo que uma vez incorporado no solo pode desempenhar um papel importante no sequestro de carbono (Satin e Doerr, 2012).

Tabela 2-4 - Concentração de COS em todas as encostas, em %.

	EQG	EQX-1	PQX	EQX-2	EQX-3		ENQX
Cinzas	29 ± 5	26 ± 8	31 ± 7	31 ± 4	35 ± 7	Manta morta	46 ± 2
0-2 cm	16 ± 4	17 ± 8	16 ± 5	18 ± 2	18 ± 6	0-2 cm	10 ± 2
2-5 cm	12 ± 2	14 ± 5	13 ± 2	13 ± 2	13 ± 5	2-5 cm	9 ± 2

Observa-se em ambas as profundidades pouca variação da concentração de carbono entre encostas. A encosta de controlo (ENQX) apresenta valores inferiores às encostas queimadas, tanto na camada de 0 a 2 cm, em média cerca de 7%, como na camada de 2 a 5 cm, em média cerca de 4%. A concentração de carbono no solo diminui em profundidade em todas as encostas estudadas. Estudos indicam que o fogo não modifica significativamente o *stock* de carbono e azoto no solo a partir da profundidade de 5 cm (Alexis *et al.*, 2007).

Para calcular o *stock* de carbono orgânico no solo, no 1º mês após o incêndio, foi utilizada uma fórmula com base na densidade aparente do solo, calculada em solo seco (2).

$$\text{Stock } C_{\text{org}} (\text{solo}) = \text{Concentração } C_{\text{org}} \times \text{Densidade aparente} \times \text{Profundidade} \quad (2)$$

No cálculo do *stock* de carbono orgânico nas cinzas e na manta morta foi utilizada uma fórmula com base na massa total seca recolhida de cinzas e manta morta (3).

$$\text{Stock } C_{\text{org}} (\text{cinzas/manta morta}) = C_{\text{org}} (\text{cinzas/manta morta}) \times \frac{\text{Massa total recolhida}}{\text{Área de recolha}} \quad (3)$$

A determinação do erro associado a cada valor do *stock* de carbono orgânico foi realizada através do método de propagação de erros aleatórios, utilizando derivadas parciais. A Tabela 2-5 apresenta os resultados obtidos nas diferentes camadas, assim como o valor total do *stock* de carbono nas encostas. Estes valores encontram-se representados graficamente na Figura 2-7.

Tabela 2-5 – Stock de carbono orgânico em todas as encostas, em kg.m^{-2} .

	EQG	EQX-1	PQX	EQX-2	EQX-3		ENQX
Cinzas	$0,16 \pm 0,05$	$0,1 \pm 0,9$	$0,18 \pm 0,07$	$0,17 \pm 0,04$	$0,19 \pm 0,06$	Manta morta	$1,82 \pm 0,02$
0-2 cm	$2,3 \pm 0,4$	3 ± 1	$2,3 \pm 0,6$	$4,20 \pm 0,02$	$3,12 \pm 0,06$	0-2 cm	$1,8 \pm 0,4$
2-5 cm	$2,6 \pm 0,2$	3 ± 1	$2,9 \pm 0,2$	$4,61 \pm 0,02$	$3,49 \pm 0,05$	2-5 cm	$2,3 \pm 0,4$
Total	$5,1 \pm 0,4$	6 ± 1	$5,4 \pm 0,6$	$8,98 \pm 0,04$	$6,80 \pm 0,06$	Total	$5,9 \pm 0,4$

A encosta EQX-2 apresentou o maior *stock* de carbono de todas as encostas, 9 kg.m^{-2} , nas restantes encostas o *stock* varia entre 5 e 7 kg.m^{-2} , isto deve-se ao facto desta encosta apresentar maior densidade aparente (Tabela 2-1).

Apesar da concentração de carbono ser superior na camada de cinzas comparativamente com as camadas superficiais de solo (Tabela 2-4), são estas que mais contribuem para o *stock* de carbono orgânico nas encostas queimadas. Na encosta não queimada, a contribuição da camada de manta morta é praticamente igual à contribuição das camadas superficiais de solo.

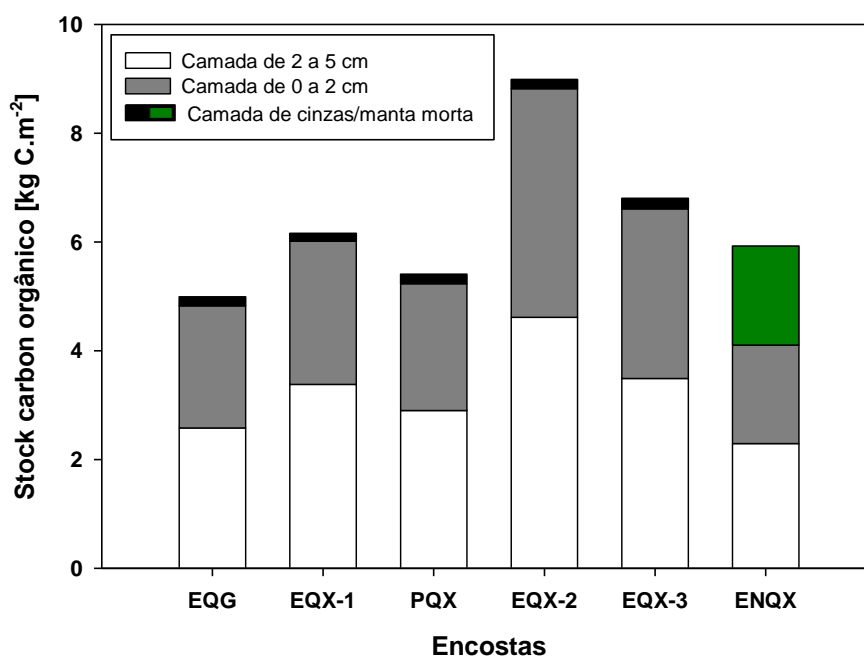


Figura 2-7 - Stock de carbono orgânico no solo nas diferentes encostas.

Segundo Madeira et al. (2004) a quantidade de C orgânico até à profundidade de 30 cm nos solos de Portugal Continental é extremamente variável, obtendo-se valores entre 0,21 e 23,50 kg.m⁻². Os resultados obtidos encontram-se dentro deste intervalo, ressalvando que são relativos apenas aos primeiros 5 cm de solo. Estudos tendo em conta o tipo de solo revelaram que o valor do conteúdo em COS na camada superficial de 0 a 30 cm é superior em leptosolos, 8,4 kg.m⁻² (Batjes, 2002), relativamente a cambisolos, varia entre 5,0 kg.m⁻² e 6,0 kg.m⁻² (Batjes, 1996 e 2002). Neste estudo verifica-se que o solo da encosta EQX-2, leptosolo, apresenta um maior conteúdo em COS que as encostas de cambisolos.

Num estudo recente sobre efeitos do fogo em florestas de pinheiro na área mediterrânea, o *stock* de carbono orgânico na área afetada pelo incêndio foi 1,10 kg.m⁻² e na área de controlo 0,77 kg.m⁻² (Certini *et al.*, 2011), estes valores são relativamente menores que os do presente estudo.

2.3.2. Variação temporal da concentração de carbono no solo

Da análise do conteúdo em carbono em todos os pontos amostrados, observa-se que a concentração de COS ao longo do tempo é sempre maior na camada superficial quando comparada com a camada 2-5 cm, isto verifica-se em todas as encostas queimadas e na encosta de controlo. Para além disso verificou-se que a variabilidade espacial entre pontos de amostragem diminui em profundidade, visível na Figura 2-8 através dos desvios-padrão, isto é existe mais heterogeneidade na camada de 0 a 2 cm. Este resultado é esperado já que o teor de matéria orgânica em solos varia horizontalmente e verticalmente no perfil do solo (Jobbágy e Jackson, 2000). Torna-se necessário referir que a primeira recolha ocorreu antes da época das chuvas, portanto os valores encontrados representam a concentração antes da influência da precipitação.

A Figura 2-8 representa a variação temporal da concentração de carbono no solo nas encostas queimadas estudadas. Relativamente às encostas afetadas pelo fogo, os valores máximos de COS registam-se no 1º mês após o incêndio, com valores entre 16 e 18% para a camada superficial de 0-2 cm e com valores entre 12 e 14% para a profundidade 2-5 cm. A partir do qual a concentração diminuiu consideravelmente ao longo dos primeiros 6 meses, registando-se valores entre 9 e 12% na camada superficial de 0-2 cm e valores entre 6 e 8% na profundidade 2-5 cm.

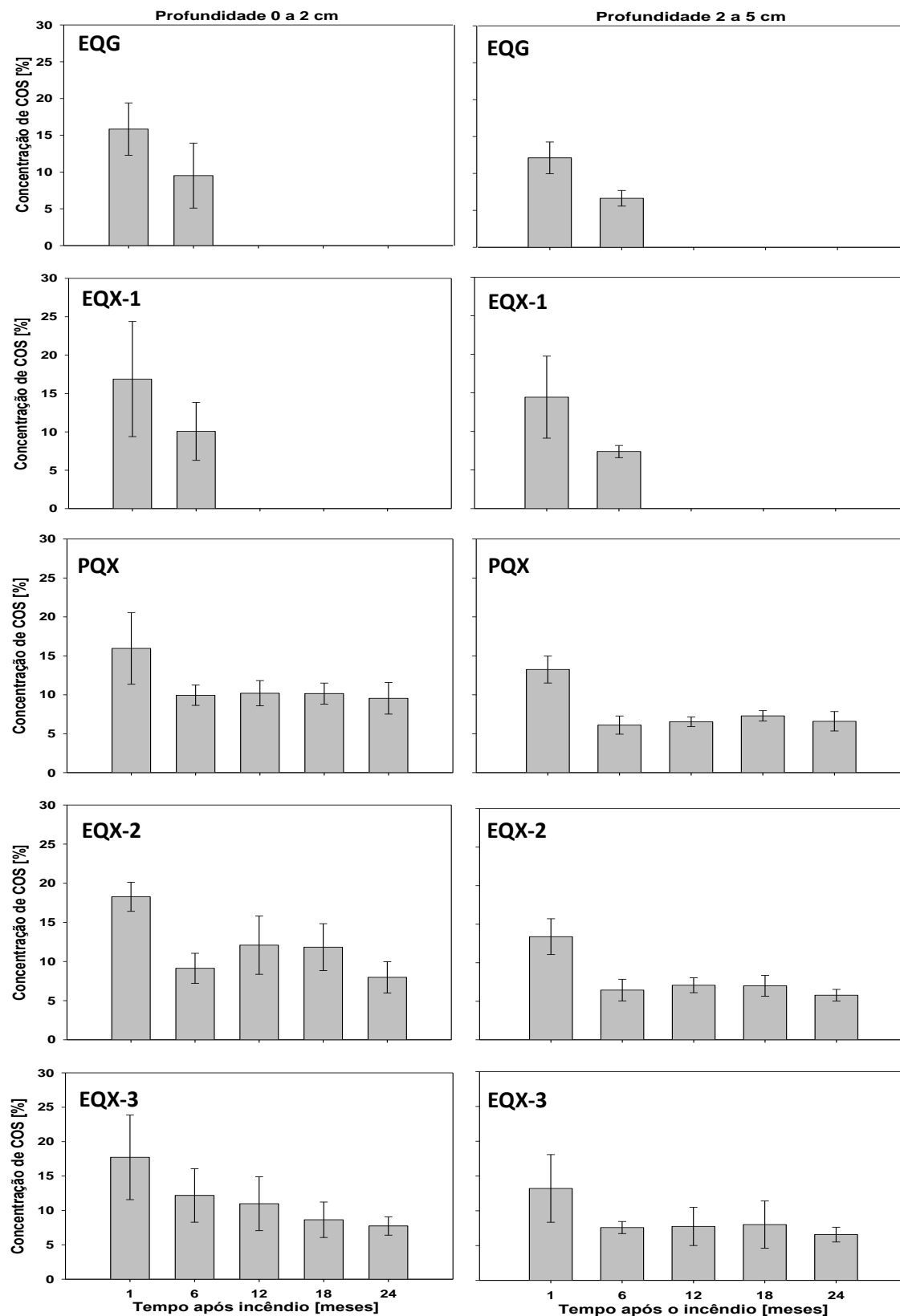


Figura 2-8 - Variação temporal da concentração de COS [%] nas encostas queimadas.

Ao longo do período de monitorização de dois anos, observa-se um ligeiro aumento de carbono no 12º e 18º mês, exceto na camada superficial 0-2 cm na encosta EQX-3 que diminui

gradualmente, registando-se valores mais baixos no 24º mês, com valores entre 8 e 10% na camada superficial de 0-2 cm e valores entre 6 e 7% na profundidade 2-5 cm. Para além disso nas encostas EQG, EQX-1, PQX e EQX-2, a concentração de COS média varia de igual modo nas duas profundidades analisadas, aumentando e diminuindo para uma mesma data.

Em geral não se verifica nenhum padrão sazonal nas encostas queimadas, no entanto a encosta de controlo, ENQX (Figura 2-9), apresenta um padrão sazonal na camada de 0-2 cm, em que a concentração aumenta no inverno, em fevereiro, diminuindo no verão, em agosto. A precipitação aumenta a humidade do solo, promovendo condições favoráveis ao crescimento da vegetação e subsequente acumulação na camada de manta morta, o que beneficia a acumulação de carbono orgânico no solo. No entanto, na profundidade 2-5 cm verifica-se o oposto, a concentração diminui no inverno e aumenta no verão, apesar da variação não ser muito significativa. Alguns autores afirmam que não existe uma variação significativa no conteúdo de carbono no solo de estação para estação (Nipithwittaya e Sampanpanish, 2012).

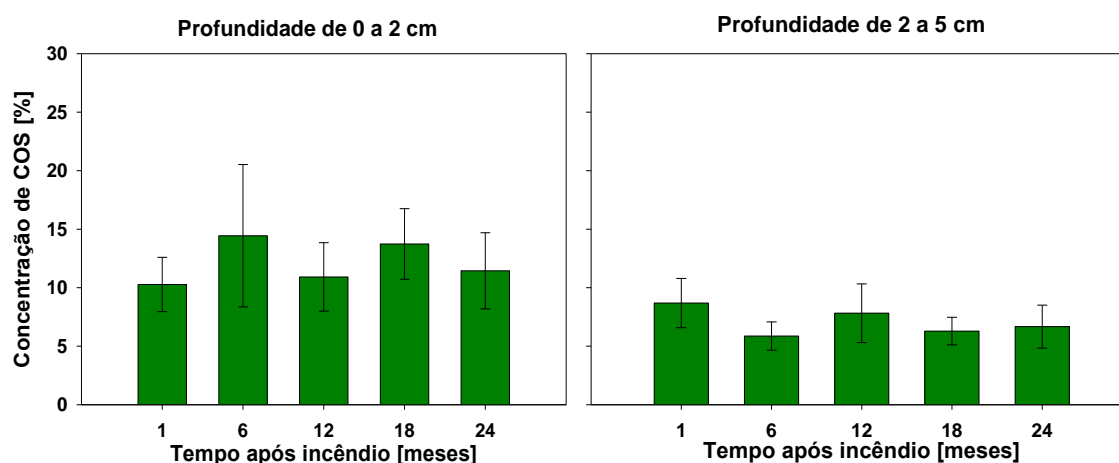


Figura 2-9 – Variação temporal da concentração de COS [%] na encosta não queimada.

2.3.3. Variação temporal da concentração de COS em função da geologia

Para avaliar o efeito da geologia de um solo na concentração de carbono comparou-se o comportamento de duas encostas, EQG e EQX-1 (Figura 2-10). Ambas têm coberto vegetal predominante de eucalipto diferindo apenas na rocha-mãe, granito na encosta EQG e xisto na encosta EQX-1. Os solos destas encostas caracterizam-se por serem pouco profundos, o que sugere grande influência da rocha-mãe.

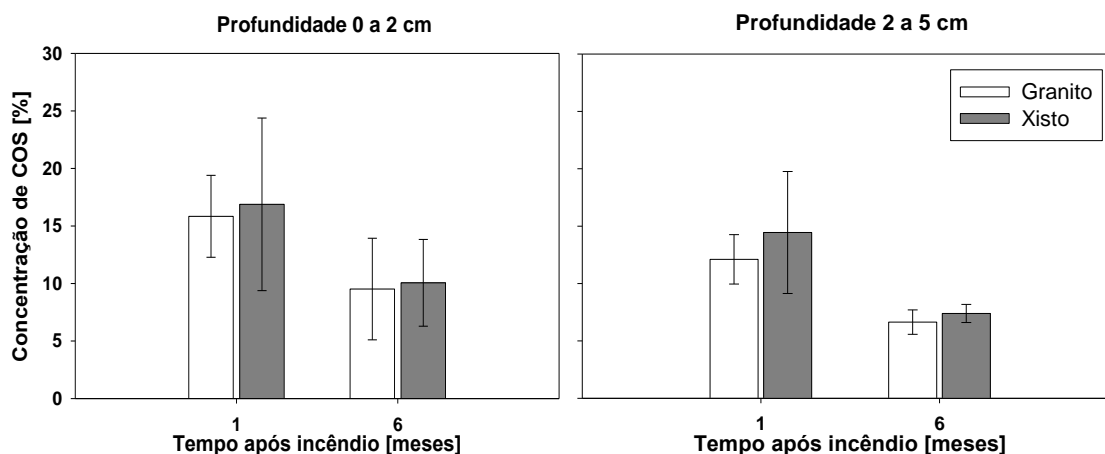


Figura 2-10 - Variação temporal do COS em encostas com diferente geologia.

Ao analisar as duas profundidades observa-se que a concentração média de COS da encosta com rocha-mãe xisto é superior, entre 0,5 e 1% na camada de 0-2 cm e 1 e 2% na camada 2-5 cm, à concentração média da encosta com rocha-mãe granito. Apesar destes valores serem próximos a concentração na encosta EQX-1 é sempre superior à concentração na encosta EQG.

Turrión *et al.* (2009) encontrou resultados onde os solos de xistos mostraram maior conteúdo em carbono, em todo o perfil do solo, do que os solos de granitos. Estudos recentes demonstram que, dentro de um determinado ecossistema, os mecanismos de sequestro de COS variam significativamente entre os materiais de origem geológica, devido à variação da associação mineral do solo e das propriedades físico-químicas do solo (Torn *et al.*, 1997, Rasmussen *et al.*, 2006). A associação mineral do solo controla o conteúdo em carbono diretamente através da sua influência sobre os compostos químicos e o pH da superfície do solo e, indiretamente através da influência na estrutura da comunidade microbiana e acesso ao carbono no solo (Heckman *et al.*, 2009). A textura do solo, derivada do material de origem, é um fator fundamental para a acumulação de matéria orgânica no solo (Gallardo *et al.*, 1980). Os solos sob uma rocha-mãe de xisto têm compostos de Fe e Al sesquióxidos (na forma Al_2O_3), que juntamente com a acidez, facilitam a formação de complexos que protegem a MOS da mineralização e conduzem à acumulação de carbono orgânico no solo (Turrión *et al.*, 2009). Para além disso, devido à natureza da rocha-mãe, os solos de constituição geológica de xisto degradam-se mais facilmente que solos de granito, devido a ser uma rocha metamórfica, o que facilita o desenvolvimento do solo.

2.3.4. Variação temporal da concentração de COS em função do coberto vegetal

De modo a avaliar o efeito de diferentes povoamentos florestais na concentração de carbono no solo, comparou-se o comportamento de duas encostas, PQX e EQX-3 (Figura 2-11). Ambas têm como rocha-mãe xisto diferindo apenas na espécie predominante do coberto vegetal, pinheiro na encosta PQX e eucalipto na encosta EQX-3.

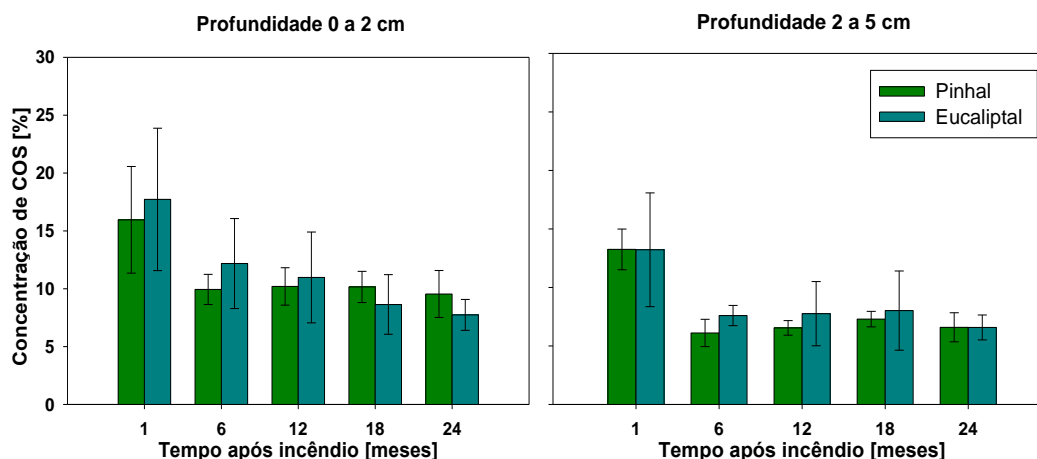


Figura 2-11 - Variação temporal do COS em função do coberto vegetal.

Na camada superficial de 0-2 cm a concentração média na encosta com eucalipto é ligeiramente superior (entre 1 e 2%) no primeiro ano em relação à encosta com pinhal. A partir da qual a concentração no pinhal se torna superior em cerca de 2%. Na profundidade 2-5 cm observa-se um comportamento semelhante, com a concentração na encosta com eucalipto a ser superior entre 1 e 2% à encosta com pinhal, exceto no 1º e último mês, onde as concentrações se igualam.

A vegetação constitui a principal fonte de resíduos da fração orgânica do solo. A produção e qualidade da folhada em sistemas florestais têm uma grande importância na acumulação e no tipo de matéria orgânica do solo e no ciclo de nutrientes, pelo que é de esperar que a produção de biomassa e as características deste afetem as propriedades do solo, a pedogénese e a produtividade e sustentabilidade destes sistemas (Fisher *et al.*, 2000). De um modo geral, as gimnospermas (Pinheiro-bravo) apresentam uma produtividade superior às angiospermas (Eucalipto) (Bray, 1972). Assim, a acumulação de resíduos no solo é frequentemente mais elevada para as resinosas (pinheiro-bravo) que para as folhosas (eucalipto). Segundo Silva (2007) a matéria orgânica proveniente de folhada de eucalipto transporta grandes quantidades de nutrientes, tem pH elevado e decompõe-se rapidamente,

não produzindo matéria orgânica estável. Os solos de eucaliptal quando comparados com solos de pinhal ou carvalhal apresentam maior compactação, maior densidade aparente, menor porosidade e uma estrutura menos estável e menos desenvolvida. O que indica que seria de esperar que a concentração de carbono orgânico no solo fosse superior em solos com povoamentos florestais de pinhal, no entanto os solos estudados sofreram grandes alterações com o incêndio, que destruiu a biomassa aérea e a camada de manta morta. Por ser uma espécie de crescimento rápido, a recuperação é mais rápida nas encostas com eucalipto, enquanto na encosta com pinheiro esta recuperação é mais lenta, observando-se pinheiros dispersos e relativamente pequenos 2 anos após o incêndio.

2.3.5. Efeito do fogo na variação temporal da concentração de COS

Para avaliar o efeito do fogo na concentração de carbono no solo comparou-se o comportamento temporal de duas encostas (ENQX e EQX-3) com as mesmas características, povoamento florestal de eucalipto sob rocha-mãe xisto (Figura 2-12). A encosta EQX-3 foi afetada pelo fogo e a encosta ENQX é a encosta de controlo e encontra-se fora da área afetada pelo incêndio.

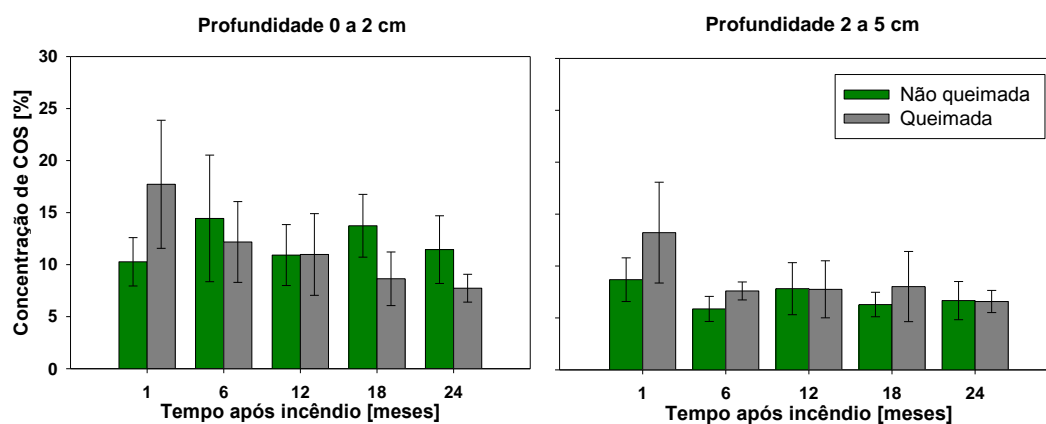


Figura 2-12 - Efeito do fogo na variação temporal de COS.

Observa-se a partir dos gráficos que a concentração de carbono na encosta de controlo segue um padrão sazonal (aumenta no inverno e diminui no verão), enquanto na encosta queimada diminui ao longo do tempo. Na camada superficial de 0 a 2 cm, a concentração de carbono no 1º mês após o incêndio é consideravelmente superior na encosta queimada, 6%. Após esta data e ao longo do período de estudo, a concentração de carbono é inferior, entre 2 e 5%, exceto no 12º mês onde a concentração se iguala. Na profundidade de 2 a 5 cm também se verifica que a concentração de carbono no 1º mês após o incêndio é superior na encosta queimada, 5%. No entanto, a partir desta data e ao longo do período de estudo a concentração de carbono é

superior, 2%, na encosta queimada, exceto no 12º mês que é praticamente igual. Este comportamento indica que logo após o incêndio existe um aumento do carbono orgânico no solo e que, ao longo do tempo a concentração tende para os valores pré-fogo ou para valores menores do que nas condições pré-fogo.

A queda de folhas a partir da vegetação durante o incêndio contribui para o *stock* de manta morta após o fogo. Portanto, a diferença entre a composição da camada de manta morta antes e depois do fogo, não é apenas devido à carbonização, mas também à queda de biomassa durante o incêndio. Na realidade, durante um incêndio uma proporção de biomassa do ecossistema é convertida em carvão vegetal, que contém estruturas moleculares altamente recalcitrantes e que contribuem para o armazenamento de carbono a longo prazo (Alexis *et al.*, 2007). González-Pérez *et al.* (2004) comparou características de solos afetados por incêndios com solos inalterados vizinhos e demonstrou que após um incêndio de severidade moderada é normalmente observado um aumento de carbono no solo. Este resultado também foi observado para fogos de intensidade baixa (Úbeda, 2001, Knicker *et al.*, 2006). Segundo Martí-Roura *et al.* (2009), esta diferença notou-se alguns dias após o fogo, em que a quantidade de carbono orgânico era superior em áreas queimadas comparando com áreas não queimadas, na camada superficial de 5 cm. Isto ocorreu nos diferentes tipos de vegetação estudada e deveu-se provavelmente à deposição de biomassa após o incêndio. No entanto, estas diferenças desapareceram nos anos seguintes.

O aumento de carbono orgânico no solo após o fogo está relacionado com a incorporação no solo de cinzas parcialmente queimadas, com deposição e incorporação de vegetação não queimada ou parcialmente queimada (Varela *et al.*, 2010, Certini *et al.*, 2011). Ludwig *et al.* (1996) descreveu que a decomposição parcial de raízes devido ao aquecimento do solo também pode contribuir para o aumento do conteúdo em carbono orgânico no solo.

2.3.6. Variação espacial da concentração de COS

Uma das questões que o estudo do carbono no solo levanta, é se os pontos amostrados representam a encosta em estudo. Isto é se ao ser realizado na encosta apenas um transepto com 5 pontos, eles representam a variação de carbono nessa encosta. Para este efeito estudou-se a variabilidade espacial da encosta EQX-1 (Figura 2-13 e Figura 2-14), recolhendo amostras de 18 pontos ao longo de 4 transeptos.

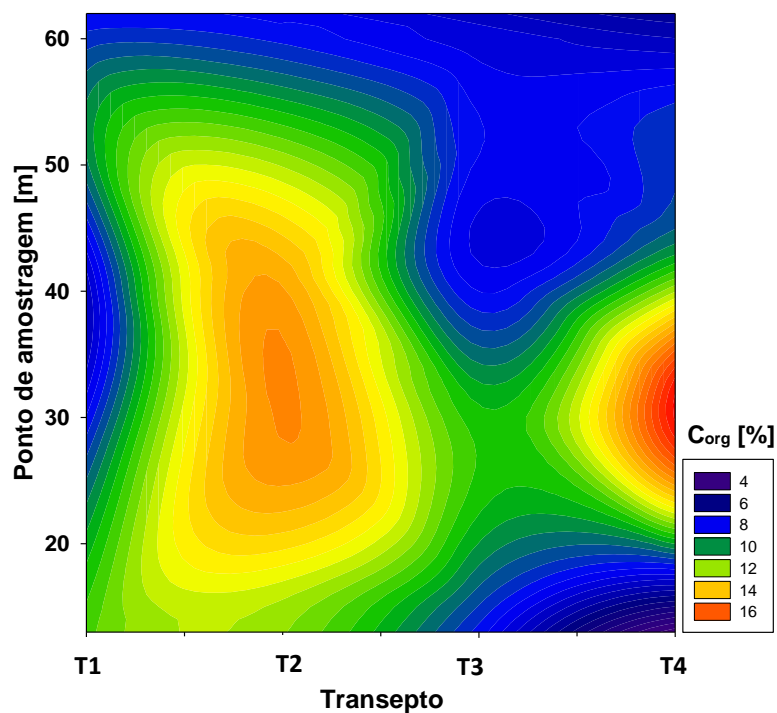


Figura 2-13 - Variabilidade espacial da concentração de COS, profundidade 0-2 cm.

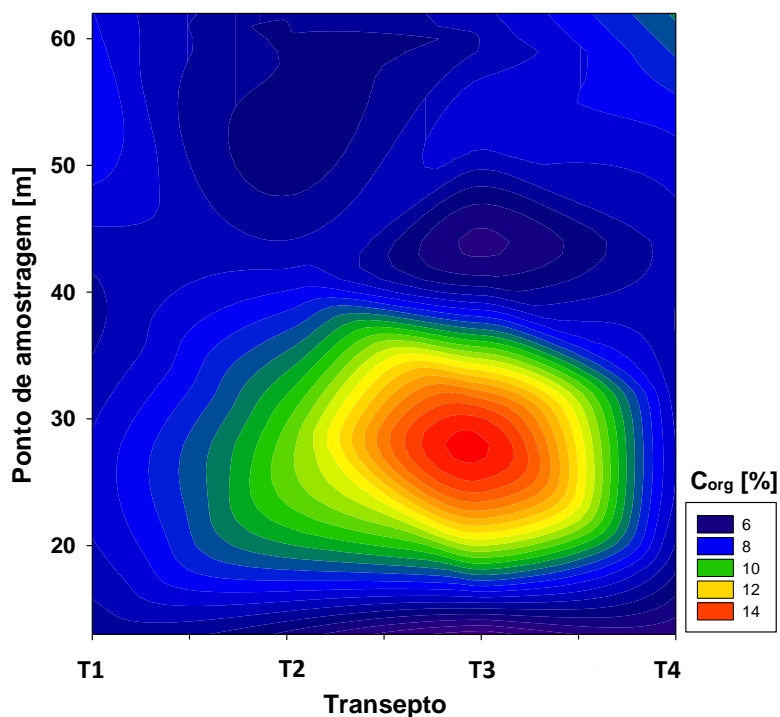


Figura 2-14 - Variabilidade espacial da concentração de COS, profundidade 2-5 cm.

A concentração de carbono na camada superficial de 0 a 2 cm (Figura 2-13) é em média 10%, variando entre 7 e 17%. É observável a ocorrência de dois picos de concentração, no transepto 2 e 4, no entanto 75% dos valores nesta profundidade são inferiores a 11%. Na camada de 2 a 5

cm a concentração de carbono (Figura 2-14) é em média 8%, variando entre 6 e 14%. Nesta profundidade verifica-se apenas um pico de concentração no transepto 3 e portanto, 75% dos valores nesta profundidade são inferiores a 8%. A partir dos gráficos é possível observar que a variabilidade espacial diminui com a profundidade, algo que já havia sido mencionado anteriormente. Observa-se também que a concentração tende a ser menor no topo da encosta, quando comparada com a base.

Apesar de existirem pontos onde a concentração de carbono é superior à média, em grande parte dos pontos de amostragem, obtiveram-se valores de concentração muito próximos da média, o que indica que ao realizar um transepto aleatório, se conseguiria uma boa representação da encosta.

No estudo da variabilidade é adequado referir alguns pressupostos. O padrão espacial da vegetação pode determinar as interações entre vegetação ou afetar o comportamento do fogo através de diferenças na disposição espacial da quantidade e qualidade de combustível (Duguy *et al.*, 2007). O padrão espacial é uma característica comum de bancos de sementes e pode estar relacionada com o padrão da vegetação através do seu efeito sobre a dispersão de sementes. Consequentemente, o padrão espacial da vegetação após o fogo, pode ter a sua origem na vegetação pré-fogo (Torres *et al.*, 2013). A topografia também afeta espacialmente o armazenamento de carbono no solo. Em primeiro lugar influencia o equilíbrio da água, facilitando a troca lateral de água por escoamento superficial, as áreas com condições de humidade favoráveis ao crescimento da vegetação, beneficiando a acumulação de manta morta. Em segundo lugar, o solo separado por erosão é transportado por escoamento superficial e pode ser realocado na paisagem (Belnap *et al.*, 2005).

2.4. Conclusões

- » O *stock* total de carbono orgânico no 1º mês após o incêndio foi superior nas encostas queimadas que na encostas não queimada.
- » A camada de cinzas e camada de manta morta são as que apresentam maior concentração em COS seguido da camada de solo de 0 a 2 cm e por fim a camada de solo de 2 a 5 cm.
- » No estudo da variação temporal de carbono nas encostas queimadas, o valor de concentração é sempre maior no 1º mês após o incêndio e a maior variação ocorre nos primeiros 6 meses, sendo relativamente estável até ao final do período de estudo. Data em que se verificam os valores mais baixos de concentração.

- » Observou-se um padrão sazonal na profundidade 0-2 cm na encosta controle, a concentração aumenta no inverno e diminui no verão. No entanto, não se verificou variação significativa na profundidade de 2-5 cm.
- » A concentração de carbono é ligeiramente superior em solos sob rocha-mãe xisto do que em solos de granito.
- » A concentração de carbono é ligeiramente superior, em eucaliptais do que em pinhais.
- » Após o incêndio existe um aumento de carbono orgânico no solo, que sugere a incorporação de biomassa florestal queimada no solo.
- » A variabilidade espacial entre os diferentes pontos mostra que, apesar de existirem picos de concentração, grande parte dos pontos têm concentrações próximas, logo é possível afirmar que cada transepto representa a variabilidade da encosta.

3. Capítulo – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao crescente debate das alterações climáticas e à relevância que o solo tem nesta problemática e ainda, devido à importância do estudo das propriedades do solo com vista à melhoria das condições necessárias para tornar o solo saudável, o estudo do conteúdo em carbono orgânico no solo é um tema atual e pertinente. O aumento do número de incêndios e o aumento de áreas florestais, bem como a falta de conhecimento sobre o conteúdo em carbono orgânico no solo tornou importante a realização do trabalho apresentado, vindo preencher uma lacuna existente neste campo em Portugal. Assim este trabalho serve para compreender melhor o processo que envolve a movimentação e estabilização de carbono orgânico no solo, com destaque para os efeitos que os incêndios têm nesta propriedade do solo.

Compreende-se que são múltiplos os fatores que podem intervir no processo de entrada e saída de carbono no solo e que, qualquer que seja a metodologia adotada e é de realçar a dificuldade na comparação direta com outros casos de estudo existentes devido à diversidade de escalas espaciais e temporais, na abordagem ao tema, nas metodologias utilizadas tanto na recolha como na análise de solos, nos tipos de solo e na vegetação em estudo. Algumas sugestões podem ser feitas para melhorar o presente estudo, apesar da dificuldade na sua implementação tendo em conta as condições logísticas e financeiras a que os projetos estão sujeitos:

»Descrever a evolução do coberto vegetal ao longo do período de monitorização, de forma a compreender a sua influência na regeneração do carbono orgânico do solo e analisar o desaparecimento das cinzas ao longo do tempo.

»Dada a variabilidade apresentada entre alguns pontos, a recolha de amostras pode ser realizada através da recolha de solo aleatória em 3 pontos numa grelha de 1 x 1 m com 100 pontos, para diminuir a influência de apenas um ponto na área envolvente à área de recolha.

»Seria interessante analisar qualitativamente o carbono orgânico ao longo do tempo, de modo a compreender que tipo de compostos subsistem logo após o incêndio, quais os que se mantêm e os que recuperam ao longo do tempo.

»Ampliar o estudo para outros tipos de solo.

Atendendo à problemática que envolve este estudo, devido à degradação causada nos solos e à recuperação lenta dos ecossistemas, sugere-se a continuação do desenvolvimento de trabalhos na área, no sentido de compreender melhor os impactos dos incêndios de modo a ser possível criar e implementar medidas de gestão que promovam o aumento do carbono orgânico no solo.

Espera-se por isso, que estes resultados possam ser úteis para trabalhos de recuperação de áreas ardidas, já que incidem no efeito que o incêndio provoca nas propriedades do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, J.M., Faure, H., Faure-Denard, L., McGlade, J.M. e Woodward, F.I. (1990) "Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present." *Nature*, 348, 711-714.
- Alexis, M.A., Rasse, D.P., Rumpel, C., Bardoux, G., Péchot, N., Schmalzer, P., Drake, B. e Mariotti, A. (2007) "Fire impact on C and N losses and charcoal production in a scrub oak ecosystem." *Biogeochemistry*, 82, 201-216.
- ARH (2002) "Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Vouga, Anexo 1 – Análise Biofísica".
- ARH (1999) "Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Vouga, Anexo 5 – Ocupação do solo e ordenamento do território".
- Arocena, J.M. (2000) "Cations in solution from forest soils subjected to forest floor removal and compaction treatments." *Forest Ecology and Management*, 133, 71-80.
- Batjes, N.H. (1996) "Total carbon and nitrogen in the soils of the world." *European Journal of Soil Science*, 47, 1-163.
- Batjes, N.H. (2002) "Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe." *Soil Use and Management*, 18, 324-329.
- Belnap, J., Welter, J.R., Grimm, N.B., Barger, N. e Ludwig, J.A. (2005) "Linkages between microbial and hydrologic processes in arid and semiarid watersheds." *Ecology*, 86, 298-307.
- Bohn, H.L., Meyer, R.A. e O'Connor, G.A. (2002) "Soil Chemistry - 2nd Edition." Wiley.
- Bray, J.R. (1972) "Litter production in forest of the world." Em: Kozlowski, T.T. "Water deficits and plant growth: Vol III". Academic Press, New York.
- Brown, T.J., Hall, B.L. e Westerling, A.L. (2004) "The impact of twenty-first century climate change on wildland fire danger in the Western United States: an applications perspective." *Climate Change*, 62, 365-388.
- Campbell, G.S., Jungbauer Jr., J.D., Bristow, K.L. e Hungerford, R.D. (1995) "Soil temperature and water content beneath a surface fire." *Soil Science*, 159, 363-74.
- Canadell, J.G., Mooney, H.A., Baldocchi D.D., Berry J.A., Ehleringer J.R., Field C.B., Gower S.T., Hollinger D.Y., Hunt J.E., Jackson R.B., Running S.W., Shaver G.R., Steffen W., Trumbore S.E., Valentini R. e Bond B.Y. (2000) "Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: a multi-technique approach for improved understanding." *Ecosystems*, 3, 115-130.
- Carvalho, A., Flannigan, M., Logan, K., Gowman, L., Miranda, A. e Borrego, C. (2010) "The impact of spatial resolution on area burned and fire occurrence projections in Portugal under climate change." *Climatic Change*, 98, 177-197.
- Castro, C.F., Serra, G., Parola, J., Reis, J., Lourenço, L. e Correia, S. (2003) "Combate a incêndios florestais. Vol III: Manual de Formação Inicial do Bombeiro" Escola Nacional de Bombeiros, Sintra.
- Catry, F., Bugalho, M. e Silva, J. (2007) "Recuperação da floresta após o fogo - O caso da Tapada Nacional de Mafra." CEABN-ISA, Lisboa.

CE/UE (2002) "Comunicação da Comissão ao Conselho, Parlamento Europeu, ao Comité Económico e Social e ao Comité das Regiões: Para uma estratégia temática de proteção do solo."

Cerdá, A. e Doerr, S.H. (2005) "The influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an eleven-year investigation." *International Journal of Wildland Fire*, 14, 423-437.

Cerri, C.C., Andreux, F. e Eduardo, B.P. (1992) "O ciclo do carbono no solo." Em: Cardoso, E.J.B.N., Tsai, S.M., Neves, M.C.P. "Microbiologia do solo." Campinas, SBCS, 73-90.

Certini, G. (2005) "Effects of fire on properties of forest soils: A review." *Oecologia*, 143, 1-10.

Chesworth, W. (2008) "Encyclopedia of Soil Science." Springer, 902

Da Costa, J.B. (1999) "1910-1965 - Caracterização e constituição do solo - 6ª Edição" Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 527.

Da Costa, J.B. (1992) "Estudo e Classificação das Rochas por Exame Macroscópico." Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

DeBano, L.F., Neary, D.G. e Ffolliott, P.F. (1998) "Fire's effects on ecosystems." New York, Wiley.

Dela Cruz, L. (2010) "Harnessing the carbon sequestration potentials of forest soils: strategies for climate change mitigation and adaptation." Guillermo Ponce Professorial Chair Lecture. College, Laguna: UPLB.

Doerr, S.H. e Thomas, A.D. (2000) "The role of soil moisture in controlling water repellency." *Journal of Hydrology*, 231, 134-137.

Duguy, B., Alloza, J.A., Röder, A., Vallejo, R. e Pastor, F. (2007) "Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in a Mediterranean landscape (eastern Spain)." *International Journal of Wildland Fire*, 16, 619-632.

Eswaran H., Van Den Berg E. e Reich R. (1993) "Organic carbon in soils of the world." *Soil Science Society American Journal*, 57, 192-194.

Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Boulet, A.K. e Lopes, F.P. (2005) "Temporal patterns of solute loss following wildfires in central Portugal." *International Journal of Wildland Fire*, 14, 401-412.

Fisher, R.F., Blinkey, D. e Pritchett, W.L. (2000) "Ecology and management of forest soils." John Wiley & Sons, New York, 241-260.

Gallardo, J.F., Cuadrado, S. e Egido, J.A. (1980) "Suelos forestales de El Rebollar (Salamanca): Propiedades y conclusiones." *Anu. Cent. Edaf. Biol. Apli.* 6, 214-228.

Giovanninni G., Lucchesi S. e Giachetti M. (1988) "Effects of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility." *Soil Science*, 146, 255-261.

González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Knicker, H. e Almendros, G. (2004) "The effect of fire on soil organic matter - a review." *Environment International*, 30, 855-870.

Heckman, K., Welty-Bernard, A., Rasmussen, C. e Schwartz, E. (2009) "Geologic controls of soil carbon cycling and microbial dynamics in temperate conifer forests." *Chemical Geology*, 267, 12-23.

- Hernández T., García C. e Reinhardt I. (1997) "Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils." *Biology and Fertility of Soil*, 25, 109-116.
- ICNF (2010) "Lista de incêndios, ao nível do local." Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa.
- ICNF (2013) "IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares." Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa.
- Janzen, H.H. (2004) "Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective." *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 399-417.
- Jobbágy E.G. e Jackson R.B. (2000) "The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation." *Ecol. Applic.*, 10, 423-436.
- Knicker, H., Almendros, G., González-Vila, F.J., González-Pérez, J.A. e Polvillo, O. (2006) "Characteristic alterations of quantity and quality of soil organic matter caused by forest fires in continental Mediterranean ecosystems: a solid-state ^{13}C NMR study." *European Journal of Soil Science*, 57, 558-569.
- Knicker, H. (2007) "How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review." *Biogeochemistry*, 118, 85-91.
- Kogel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B. e Lutzow, V.M. (2008) "An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 5-13.
- Koppen, W. (1936) "Das geographische System der Klimate." Em: Koppen, W. e Geiger, G. "Handbuch der Klimatologie: Edited 1." C. Gebr, Borntraeger, 1-44.
- Lal, R., Kimble, J.M. e Follet, R.F. (1998) "Pedospheric processes and the carbon cycle." Em: Lal, R. *et al.* "Soil processes and the carbon cycle." Boca Raton, Fla: CRC Press LLC, Cap. 1: 1-9.
- Lal, R. (2004) "Soil carbon sequestration to mitigate climate change." *Geoderma*, 123, 1-22.
- Lide, D.R. (2004) "CRC handbook of chemistry and physics." CRC Press, Boca Raton, FL.
- Ludwig, W., Probst, J.L. e Kempe, S. (1996) "Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion." *Global Biogeochemistry Cycles*, 10, 23-42.
- Machado, P. (2005) "Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global." *Química Nova*, 28, 239-334.
- Madeira, M., Ricardo, R.P., Correia, A., Monteiro, F., Raposo, A.T., Constantino, J. e Duarte, J.M. (2004) "Quantidade de carbono orgânico nos solos de Portugal Continental e particularidades nos solos do noroeste e dos montados do sul." *Edafologia*, 11, 279-293.
- Martí-Roura, M., Casals, P. e Romanyà, J. (2009) "Temporal changes in soil organic C under Mediterranean shrublands and grasslands: impact of fire and drought." *Plant Soil*, 338, 89-300.
- Miller, J.C. e Miller, J.N. (2005) "Statistics for analytical chemistry." Pearson Education, Harlow, 233.
- Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F. e Ffolliott, P.F. (1999) "Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis." *Forest Ecology and Management*, 122, 51-71.

Neary, D.G., Ryan, K.C. e DeBano, L.F. (2005) "Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water." Gen. Tech. Rep. RMRS GTR, 42, Vol 4, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 250.

Nipithwittaya S. e Sampanpanish P. (2012) "Estimation of Soil Organic Carbon Concentration accumulated in Mangrove Forest Filtration System." Res. Journal of Chemistry and Environment, 60, Vol 16, 3.

Palacios-Orueta, A., Chuvieco, E. e Carmona, C. (2002) "Trace Gas Emission Estimation in Biomass Burning." State of the Art. European Commission, Ispra, Itália.

Peck, T. e Moura, P. (2006) "O Sector Florestal Português na Perspectiva dos Mercados Internacionais de Produtos Florestais." Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, J.M.N., Silva, T.P. "Incêndios florestais em Portugal. Caracterização, impactos e prevenção." Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 74-91.

Pereira, J.S., Correia, A.V., Correia, A.P., Branco, M., Bugalho, M., Caldeira, M.C., Souto-Cruz, C., Freitas, H., Oliveira, A.C., Pereira, J.M.C., Reis, R.M. e Vasconcelos, M.J. (2002) "Forests and biodiversity." Em: Santos, F.D., Forbes, K. e Moita R. "Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures." Lisboa, Portugal, Gradiva, 363-414.

Pereira, M.G., Trigo, R.M., da Camara, C.C., Pereira, J.M.C. e Leite, S.M. (2005) "Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal." Agricultural and Forest Meteorology, 129, 11-25.

Pereira, J., Carreira, J., Silva, J. e Vasconcelos, M. (2006) "Alguns conceitos básicos sobre os fogos rurais em Portugal." Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, J.M.N., Silva, T.P. "Incêndios florestais em Portugal. Caracterização, impactos e prevenção." ISA Press, Lisboa, 133-161.

Pio, C.A., Silva, T.P. e Pereira, J.M.C. (2006) "Emissões e Impacte na Atmosfera." Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, J.M.N., Silva, T.P. "Incêndios florestais em Portugal. Caracterização, impactos e prevenção." ISA Press, Lisboa, 166-198.

Post, W.M., Emmanuel, W.R., Zinke, P.J. e Stangenberger, A.G. (1982) "Soil carbon pools and world life zones." Nature, 298, 156-159.

PROF (2006) "Plano Regional de Ordenamento Florestal do Centro Litoral." Em linha: <http://dre.pt/pdf1sdip/2006/07/14000/51725195.pdf>

Pyne, S.J. (2006) "Fogo no Jardim: Compreensão do Contexto dos Incêndios em Portugal." Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, J.M.N., Silva, T.P. "Incêndios florestais em Portugal. Caracterização, impactos e prevenção." Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 116-131.

Rowell, A. e Moore, P.F. (2000) "Global Review of Forest Fires." Gland, Switzerland: WWF Internacional & IUCN (The World Conservation Union), 66.

Rashid, G.H. (1987) "Effects of fire on soil carbon and nitrogen in a Mediterranean oak forest of Algeria." Plant Soil, 103, 89-93.

Rasmussen, C., Southard, R.J. e Horwath, W.R. (2006) "Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils." Global Change Biology, 12, 834-847.

Satin, C. e Doerr, S.H. (2012) "El papel de las cenizas de incendios forestales como sumidero de carbono." Flamma, Vol 3, 27-29.

- Schlesinger, W.H. (1997) "Biogeochemistry: An Analysis of Global Change." Academic Press, San Diego, 558.
- Shakesby, R.A. e Doerr, S.H. (2006) "Wildfire as a hydrological and geomorphological agent." *Earth-Science Reviews*, 74, 269-307.
- Shakesby, R.A. (2011) "Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions." *Earth-Science Reviews*, 105, 71-100.
- Shimadzu (2009) "User manual for Total Organic Carbon Analyzer." Shimadzu Corporation, Kyoto, Japão.
- Silva, J.S. (2007) "Pinhais e eucaliptais: a floresta cultivadas." Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento.
- SNIRH (2012) "Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos." Em linha: snirh.pt. Acedido em Dezembro de 2012.
- Stallard, R.F. (1998) "Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial." *Global Biogeochemical cycles*, 12, 231-257.
- Stevenson, F.J. e Cole, M.A. (1999) "Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients." New York, John Wiley & Sons, 427.
- Stolbovoy, V., Montanarella, L., Filippi, N., Jones, A., Gallego, J., e Grassi, G. (2007) "Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union." Version 2. EUR 21576 EN/2, 56. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Stoof, C.R., Wesseling, J.G. e Ritsema, C.J. (2010) "Effects of fire and ash on soil water retention." *Geoderma*, 159, 276-285.
- SSS (Soil Survey Staff) (1975) "Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys." U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Thomas, A.D. (1993) "Fire effects on soil, hydrology and nutrient loss: a review." University College of Swansea, Dep. Of Geography.
- Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M. e Hendricks, D.M. (1997) "Mineral control of soil organic carbon storage and turnover." *Nature*, 389, 170-173.
- Torres, I., Céspedes, B., Pérez, B. e Moreno, J. (2013) "Spatial relationships between the standing vegetation and the soil seed bank in a fire-prone encroached dehesa in Central Spain." *Plant Ecology*, 214, 195-206.
- Turrión, M.B., Schneider, K. e Gallardo, J.F. (2009) "Carbon accumulation in Umbrisols under *Quercus pyrenaica* forests: Effects of bedrock and annual precipitation." *Catena*, 79, 1-8.
- Úbeda, X. (2001) "Influencia de la intensidad de quemado sobre algunas propiedades del suelo después de un incendio forestal." *Edafología* 8, 41-49.
- USDA (2013) Em linha: <http://soils.usda.gov>. Acedido em Janeiro de 2013.
- Van Wilgan, B. e Scholes, R.J. (1997) "The vegetation and fire regimes of southern hemisphere Africa." Em: van Wilgan, B., Andreae, M.O., Goldammer J.G. e Lindesay J.A. "Fire in Southern

Africa Savannas. Ecological and Atmospheric Perspectives.” Johannesburg: Witwatersrand University Press, 26-46.

Varela, M.E., Benito, E. e Keizer, J.J. (2010) “Wildfire effects on soil erodibility of woodlands in NW Spain.” Land Degradation and Development, 21, 75-82.

Ventura, J. e Vasconcelos, M.J. (2006) “O Fogo como Processo Físico-Químico e Ecológico.” Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, J.M.N., Silva, T.P. “Incêndios florestais em Portugal. Caracterização, impactes e prevenção.” Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 94-113.

WRB (2006) IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103, FAO, Rome.

I. Anexo

A Figura I-1 representa o diagrama de funcionamento da unidade TOC-V + SSM-5000A (Shimadzu, 2009). O fornecimento de gás, oxigénio de alta pureza, é feito a partir da rede de gases instalada.

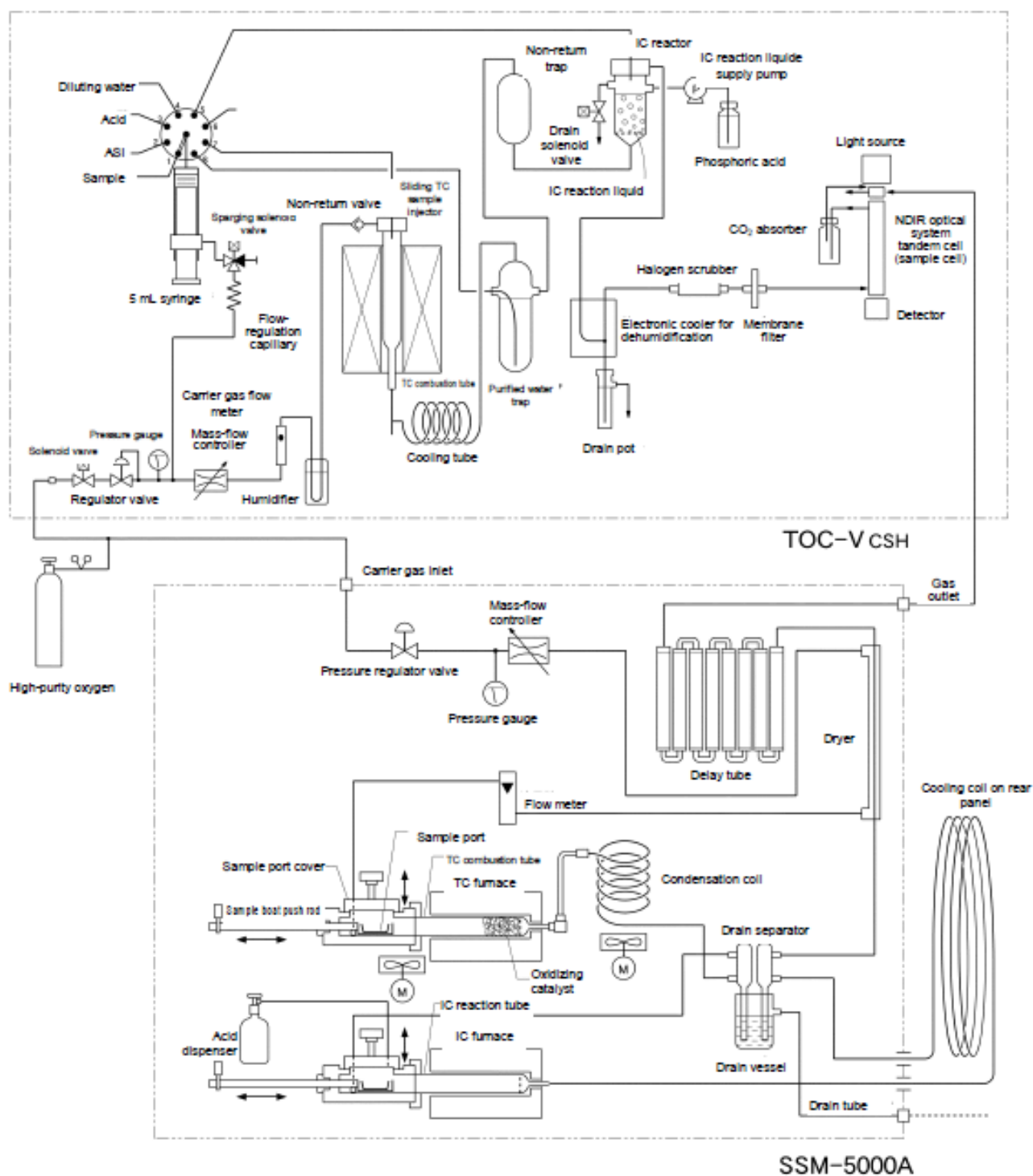


Figura I-1 - Diagrama de funcionamento da unidade TOC-V + SSM-5000A